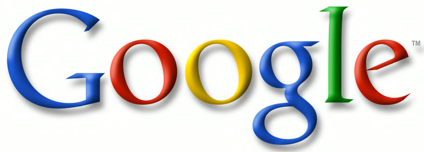
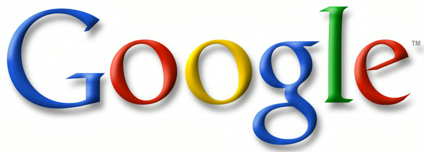
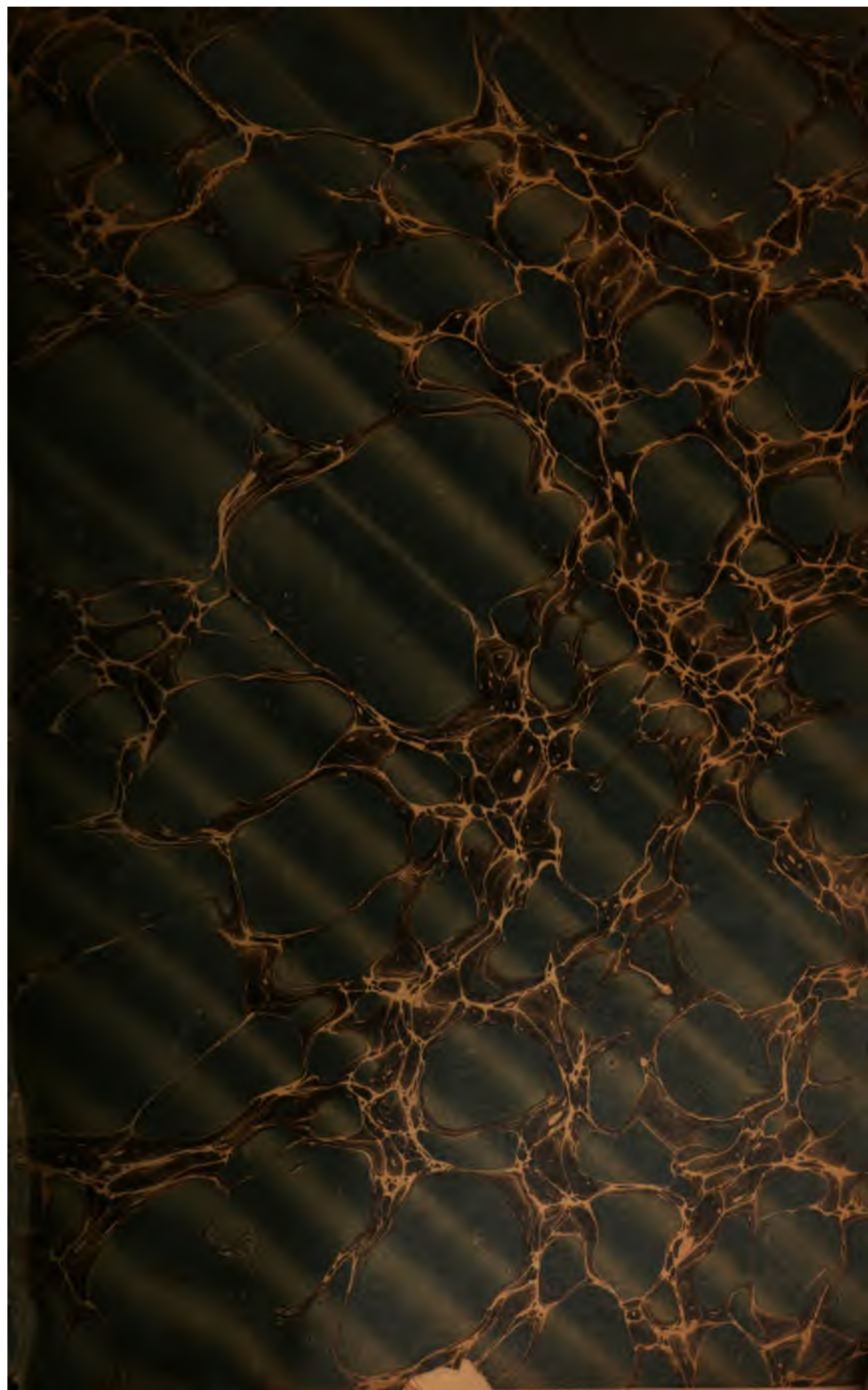



Google





# Leçons sur l'Électricité

Liége. — Imprimerie DE THIER, boulevard de la Sauvenière, 10.

# Leçons

SUR

# L'Électricité

PROFESSÉES

A L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE MONTEFIORE

ANNEXÉ A L'UNIVERSITÉ DE LIÉGE

PAR

Eric GERARD

DIRECTEUR DE CET INSTITUT

---

## TOME SECOND

**Canalisation et Distribution de l'énergie électrique**
**Applications de l'Électricité**
**à la production et à la transmission de la puissance motrice,**
**à la Traction, à la Télégraphie,**
**à la Téléphonie, à l'Éclairage et à la Métallurgie**

*Avec 257 figures dans le texte*

---

TROISIÈME ÉDITION

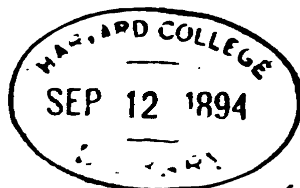
REVUE ET NOTABLEMENT AUGMENTÉE

---

PARIS
GAUTHIER-VILLARS ET FILS
ÉDITEURS
Quai des Grands-Augustins, 55

LIÉGE
LÉON DE THIER
DÉPOSITAIRE POUR LA BELGIQUE
Boulevard de la Sauvenière, 10

1893


SEP 12 1894

# AVANT-PROPOS

*Après avoir exposé dans le premier volume de cet ouvrage la théorie de l'électricité et les modes de production de cet agent, l'auteur développe dans cette seconde partie les applications industrielles basées sur les effets mécaniques, lumineux, calorifiques ou chimiques du courant, y compris la télégraphie et la téléphonie qui empruntent les propriétés mécaniques de l'électricité. Il débute par une description des canalisations et des distributions qui forment le lien entre les appareils qui engendrent la puissance électrique et ceux qui l'utilisent.*

*L'art de l'Électrotechnique a eu le privilège d'exciter l'imagination des inventeurs au point que les solutions données aux problèmes pratiques ont surgi avec une fécondité surprenante dans ces dernières années, ainsi qu'on peut s'en rendre compte en visitant les installations électriques et en feuilletant les revues spéciales et les recueils de brevets.*

*La préoccupation de l'auteur a été de chercher à dégager, au milieu de cette richesse d'informations, des préceptes généraux destinés à guider les ingénieurs. Une fois les règles fixées, il en a montré l'application à des exemples existants. Fidèle à la méthode adoptée dans le premier volume, il a, chaque fois que l'occasion s'en est offerte, indiqué la voie à suivre dans la conception des projets d'installations, ne dédaignant pas d'entrer dans des détails de devis dont l'utilité sera appréciée par les personnes vouées à l'étude des questions industrielles.*

# DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

---

## CONDUCTEURS.

473. — **Circuits électriques. Retour par la terre. Division.** — Les canalisations électriques servent à relier les générateurs qui produisent le courant aux récepteurs, tels que les lampes et les moteurs, qui l'utilisent. Il est donc logique, après avoir décrit les générateurs et les transformateurs électriques, de passer en revue les canalisations avant d'aborder l'étude des récepteurs.

Un générateur est généralement relié à un récepteur par deux conducteurs soutenus par l'intermédiaire de corps isolants destinés à éviter les déperditions du flux électrique. Parfois, cependant, on n'emploie qu'un seul conducteur spécial isolé, la seconde connexion entre les appareils étant établie par une conduite métallique existante. Dans les villes, les conduites d'eau, par exemple, ont souvent des joints matés au plomb qui assurent à l'ensemble des tuyaux une conductibilité suffisante pour certaines applications

spéciales. Il n'en est pas de même des conduites de gaz dont les joints renferment ordinairement des matières mauvaises conductrices.

Dans les applications télégraphiques et téléphoniques, les circuits électriques sont ordinairement complétés de cette manière. Lorsqu'il n'existe pas de conduites métalliques entre les postes de transmission et de réception, on établit un *retour par la terre*, c'est à dire qu'on fait communiquer le générateur et le récepteur avec le sol par des tuyaux ou des plaques métalliques enfouis dans la terre humide ou immergés dans l'eau, et tout se passe alors comme si la terre servait de conducteur de retour; en effet, le potentiel du sol étant sensiblement le même aux deux extrémités de la ligne, le résultat est le même que si ces extrémités communiquaient directement.

Ce procédé peut suffire avec les courants faibles, mais il n'est guère admissible lorsqu'on a affaire aux courants intenses employés dans les applications industrielles de l'électricité. La variabilité de la résistance au contact des *plaques de terre* et du sol, due particulièrement aux phénomènes d'électrolyse qui se produisent à la surface des plaques, apporterait dans ces courants des perturbations inadmissibles.

Dans certains systèmes de traction électrique, le générateur fixe communique avec le moteur, porté par le véhicule, à l'aide d'un conducteur isolé, d'une part, et des rails, d'autre part. Dans ce cas, pour diminuer la résistance du circuit, on relie les rails aux conduites métalliques voisines. On peut, dans le même but, les mettre en relation par des plaques de terre avec des puits, attendu que ceux-ci communiquent entr'eux par des nappes aquifères souterraines.

Ce procédé permet d'économiser un conducteur de retour, mais il nuit aux communications téléphoniques lorsque ces dernières, au lieu de se faire par double fil, emploient également le retour par la terre. Il se produit, en effet, entre les conducteurs qui prennent terre dans le voisinage les uns des autres, des dérivations de courant susceptibles d'empêcher ou de gêner l'audition téléphonique.

Le retour par la terre présente parfois certains dangers. Lorsqu'une personne reposant sur le sol humide touche le conducteur isolé, il se forme à travers son corps une dérivation de courant qui, dans le cas où le conducteur est à un potentiel très élevé, peut occasionner des accidents graves.

Lorsque le circuit est parcouru par des courants alternatifs, on constate, dans un cas semblable, une succession de décharges qui ont une action spéciale sur le système nerveux. Le retour par la terre ou par un conducteur non isolé a, en outre, l'inconvénient de favoriser les courts-circuits.

Les canalisations électriques se partagent en deux classes : les *canalisations aériennes* et les *canalisations souterraines*. Les premières comportent des conducteurs fixés sur des supports en bois ou en fer par l'intermédiaire d'isolateurs. Les canalisations souterraines présentent des conducteurs supportés dans des caniveaux ou des égouts, ou simplement enfouis dans le sol.

Le cuivre et les alliages de cuivre sont à peu près exclusivement employés dans les canalisations destinées aux applications industrielles de l'électricité. Dans les lignes aériennes utilisées pour la télégraphie, on fait cependant encore usage de fil de fer ou d'acier galvanisé, en vue de restreindre la dépense de premier établissement.

Dans les lignes souterraines, on se sert de cuivre, dont la résistance spécifique ne doit guère dépasser 1,654 microhm-cm à la température de 0° C. On exprime souvent la conductibilité du cuivre par rapport à celle d'un étalon qualifié de cuivre pur et établi par Matthiessen à une époque où la préparation industrielle de ce métal laissait à désirer. On trouve actuellement des cuivres ayant 105 pour 100 de la conductibilité de l'étalon Matthiessen. Pour éviter toute ambiguïté, le mieux est d'exprimer, dans les cahiers des charges, la résistance spécifique du métal en ohms-cm.

**474. — Section à donner aux conducteurs. Condition de sécurité.** — La section à donner aux conducteurs qui transportent l'énergie électrique d'une station génératrice à des appareils récepteurs est définie par trois conditions distinctes.

La section doit être suffisante pour éviter que l'échauffement dû à l'effet Joule ne soit de nature à compromettre la solidité des conducteurs s'ils ont à supporter des efforts de traction, comme c'est le cas pour les fils aériens, ou à détériorer la gaine isolante dont les conducteurs peuvent être recouverts.

En deuxième lieu, il convient d'examiner la question au point de vue économique, en tenant compte du coût des conducteurs et du prix de l'énergie perdue en chaleur.

Enfin, lorsque plusieurs récepteurs sont échelonnés en dérivation sur les conducteurs, la tension à laquelle ces appareils sont soumis ne peut varier au delà d'une certaine limite d'un appareil à l'autre, ce qui détermine la chute de potentiel admissible entre les récepteurs extrêmes.

Examinons d'abord la question de l'échauffement. Les conducteurs traversés par le courant tendent à se refroidir par rayonnement et par conductibilité, éléments qui varient avec la nature, la forme, la section et l'état de la surface des conducteurs, ainsi qu'avec les isolants et les revêtements protecteurs employés. Le calcul de la température de régime est généralement très complexe et donne lieu à beaucoup d'incertitude. C'est pourquoi on préfère relever empiriquement la température acquise par les conducteurs soumis à des courants déterminés.

M. Kennely a fait, dans le laboratoire de M. Edison, un grand nombre d'essais en vue de déterminer l'échauffement des conducteurs aériens, ainsi que des conducteurs recouverts de coton et enfermés dans des moulures en bois, comme c'est généralement le cas pour les fils qui sont posés à l'intérieur des habitations.

1° *Fils nus suspendus à l'air libre.* Des conducteurs en cuivre, de diametres variant entre 0,2 cm et 2,4 cm, ont été librement suspendus comme les fils aériens et soumis à des courants d'intensités croissantes. Pour chaque intensité, la température de régime était atteinte à 3 pour 100 près en une dizaine de minutes. On mesurait cette température par l'observation de l'accroissement de résistance électrique du métal. On a relevé ainsi les données contenues dans le tableau ci-après.

*Intensités minima, en ampères, capables d'élever la température des fils aériens en cuivre nu de 5°, 10°, 20° et 40° dans l'air calme. (Résistance spécifique du cuivre : 1,654 microhm-cm à 0° C.)*

| DIAMÈTRES EN CM. | 5° C. | | 10° C. | | 20° C. | | 40° C. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | FIL POLI | FIL NOIRCI | FIL POLI | FIL NOIRCI | FIL POLI | FIL NOIRCI | FIL POLI | FIL NOIRCI |
| 0,2 | 21 | 23 | 29 | 31 | 40 | 44 | 55 | 59 |
| 0,4 | 52 | 54 | 71 | 75 | 100 | 105 | 139 | 145 |
| 0,6 | 90 | 93 | 125 | 132 | 175 | 184 | 244 | 256 |
| 0,8 | 139 | 141 | 192 | 200 | 268 | 280 | 370 | 388 |
| 1,0 | 190 | 196 | 264 | 276 | 367 | 380 | 506 | 533 |
| 1,2 | 245 | 257 | 343 | 360 | 478 | 501 | 560 | 600 |
| 1,4 | 310 | 325 | 432 | 453 | 602 | 632 | 816 | 877 |
| 1,6 | 375 | 393 | 525 | 553 | 728 | 765 | 1 000 | 1 060 |
| 1,8 | 443 | 465 | 625 | 660 | 870 | 910 | 1 190 | 1 260 |
| 2,0 | 517 | 544 | 728 | 765 | 1 010 | 1 060 | 1 400 | 1 470 |
| 2,2 | 586 | 624 | 839 | 880 | 1 160 | 1 220 | » | » |
| 2,4 | 680 | 710 | 950 | 995 | 1 300 | 1 370 | » | » |

2° ***Fils de cuivre isolés, posés dans des moulures en bois à l'intérieur des habitations.*** Les essais ont porté sur des fils ayant de 0,3 à 1,13 cm de diamètre. L'élévation maxima de température admise a été déduite de la règle recommandée par l'*Institution of Electrical Engineers* de Londres, suivant laquelle la température ne doit pas s'élever à plus de 41°7 C au-dessus de la température ambiante, lorsque le courant atteint une intensité double de l'intensité normale. Il en résulte que, comme les échauffements sont sensiblement proportionnels au carré des intensités, le courant normal ne doit pas amener dans le fil une élévation de température supérieure à 10°4 C.

La limite supérieure des intensités et la limite inférieure des diamètres répondant à cette condition sont données par les formules suivantes, tirées des résultats d'expériences.

$$I_{amp.} = 4{,}375\ d^{3/2}_{mm}$$
$$d_{mm} = 0{,}374\ I^{2/3}_{amp.}$$

Le tableau suivant a été calculé d'après cette double formule. Il montre qu'on ne peut pas fixer, comme on l'a fait par erreur, une

densité de courant uniforme pour les fils de divers diamètres. Il fait ressortir en outre qu'il est économique de subdiviser les conducteurs destinés au transport des courants intenses, en vue d'accroître la surface de rayonnement.

| INTENSITÉS MAXIMA EN AMPÈRES. | DIAMÈTRES MINIMA EN MM. | PERTES DE CHARGE EN VOLTS PAR KM. | INTENSITÉS MAXIMA EN AMPÈRES. | DIAMÈTRES MINIMA EN MM. | PERTES DE CHARGE EN VOLTS PAR KM. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,38 | 165,0 | 85 | 7,24 | 38,6 |
| 5 | 1,09 | 100,0 | 90 | 7,52 | 37,9 |
| 10 | 1,75 | 77,7 | 95 | 7,80 | 37,2 |
| 15 | 2,29 | 68,1 | 100 | 8,08 | 36,5 |
| 20 | 2,77 | 62,1 | 110 | 8,61 | 35,3 |
| 25 | 3,20 | 58,1 | 120 | 9,09 | 34,6 |
| 30 | 3,61 | 54,8 | 130 | 9,58 | 33,7 |
| 35 | 4,01 | 51,8 | 140 | 10,1 | 33,7 |
| 40 | 4,37 | 49,9 | 150 | 10,5 | 32,0 |
| 45 | 4,72 | 48,1 | 175 | 11,7 | 30,5 |
| 50 | 5,08 | 46,1 | 200 | 12,8 | 29,1 |
| 55 | 5,41 | 44,7 | 225 | 13,8 | 28,0 |
| 60 | 5,72 | 43,7 | 250 | 14,9 | 26,8 |
| 65 | 6,05 | 42,3 | 275 | 15,8 | 26,2 |
| 70 | 6,35 | 41,3 | 300 | 16,8 | 25,3 |
| 75 | 6,55 | 40,3 | 350 | 18,6 | 24,1 |
| 80 | 6,90 | 39,3 | 400 | 20,3 | 23,1 |

Dans les câbles souterrains, on peut admettre des échauffements supérieurs en vue de tirer le meilleur parti possible du cuivre. Les densités de courant adoptées dans ce cas varient entre 1,5 et 2,5 ampères par mm².

475. — **Condition d'économie. Règle de Thomson.** — La condition de sécurité n'est pas la seule à prendre en considération dans la détermination de la section des conducteurs. L'échauffement de ceux-ci constitue une perte d'énergie qu'on peut restreindre en augmentant leur diamètre.

Mais à tout accroissement de section correspond un surcroît de capital immobilisé, dont le service d'intérêt et d'amortissement pèse sur le prix de l'énergie électrique transmise par le conducteur. Il y a lieu de rechercher la section pour laquelle la somme représentant le prix de l'énergie perdue en chaleur ainsi que l'intérêt et l'amortissement du capital immobilisé est minima.

Appelons $i$ l'intensité du courant à transmettre, $l$ la longueur de la canalisation et $2l$ la longueur totale du conducteur, $\rho$ la résistance spécifique de celui-ci, $s$ sa section, $p$ le prix de revient, en francs, du watt-heure, $a$ le taux de l'intérêt et de l'amortissement par franc, $t$ le temps, en heures, pendant lequel le courant $i$ passe annuellement.

La perte d'énergie annuelle est

$$2\, i^2 \rho \frac{l}{s} t \text{ watts-heure};$$

d'où une dépense de

$$2\, i^2 \rho \frac{l}{s} t p \text{ francs}.$$

Il faut remarquer que la somme des frais de production de l'énergie électrique contient une quantité constante et une quantité proportionnelle à l'énergie développée. Dans certaines conditions, on a trouvé que, pour des machines de 20 à 100 kilowatts, la dépense correspondant à N watts-heure est, en francs,

$$F = 0{,}0001\ N + 0{,}003.$$

Il faut prendre pour $p$ le coefficient de cette quantité proportionnelle (0,0001 dans l'exemple précédent), c'est à dire que $p$ constitue l'excédent de dépense occasionné par la production d'un watt-heure supplémentaire à l'aide de l'installation dont on dispose.

En effet, le prix d'un watt-heure supplémentaire est, non pas le rapport $\frac{F}{N}$, mais $\frac{dF}{dN}$. Rigoureusement, la ligne qui représente le prix en fonction de l'énergie est une courbe, et il convient de prendre pour le coût du watt-heure supplémentaire le coefficient angulaire de la tangente menée à cette courbe au point qu'on considère.

Le prix de la canalisation comprend, d'une part, le coût des travaux de tranchée, de remblai, etc., qu'on peut considérer comme indépendant de la section du conducteur, d'autre part, le coût du conducteur et de son revêtement, lequel est sensiblement proportionnel à la section.

La somme est de la forme

$$2\,(m + n\,s)\,l \text{ francs},$$

*m* et *n* étant des constantes qui doivent être calculées spécialement pour chaque type de canalisation.

Cette somme est représentée annuellement par $2(m+ns)la$ francs pour l'intérêt et l'amortissement du capital immobilisé.

Le coût total annuel de la canalisation est

$$2(m+ns)la+2pi^2\rho\frac{l}{s}t=C. \qquad (1)$$

Dans les cas ordinaires, on doit fournir, à une distance donnée, une puissance électrique déterminée P, sous une différence de potentiel *e* dont la valeur maxima est fixée par des règlements ou par la nature même des récepteurs, mais qu'on choisit toujours aussi élevée que possible en vue de réduire la section des conducteurs à employer. Dans ces conditions, les valeurs de $P=ei$ et de *e* définissent l'intensité du courant sous laquelle la puissance doit être livrée. Les seules variables de l'équation (1) sont C et *s*, et le minimum de C correspond à

$$nsla=pi^2\rho\frac{l}{s}t. \qquad (2)$$

La dépense occasionnée par la transmission de l'énergie à travers la canalisation est donc minima, lorsque le prix de l'énergie perdue annuellement en chaleur est égal à l'intérêt de la partie du capital immobilisé proportionnelle à la section du conducteur.

Cette règle indiquée par Lord Thomson conduit à la densité de courant $\delta=\frac{i}{s}$ la plus économique à adopter dans les conducteurs.

On tire de (2)

$$\delta=\frac{i}{s}=\sqrt{\frac{na}{p\rho t}}=C^{te}. \qquad (3)$$

Il n'y a pas d'inconvénient à s'écarter légèrement du résultat indiqué par la formule précédente, car, aux environs de la valeur minima d'une fonction, celle-ci varie peu.

Il est intéressant de constater que la densité la plus économique est indépendante de la longueur de la canalisation. Cependant, à mesure que cette longueur augmente, la dépense occasionnée par la canalisation s'accroît et le prix de revient de l'énergie

fournie s'élève de plus en plus. On est donc limité dans la distance à laquelle on peut transporter une puissance électrique donnée par le prix qu'on retire de la vente de cette dernière et qui doit être égal au prix de revient augmenté d'un tantième de bénéfice. Le prix de revient dépend de la canalisation et du coût de la force motrice qui, dans le cas d'une chute d'eau, peut être très minime.

Il est à remarquer que l'équation (3) donne directement la chute de tension à laquelle on peut consentir sur la ligne. On a, en effet,

$$e_1 = i\rho\frac{l}{s} = l\sqrt{\frac{na\rho}{pt}}. \qquad (4)$$

Nous avons supposé dans ce qui précède que l'intensité du courant est une des données du problème. Mais il peut se présenter des cas où il en est autrement. Soit, par exemple, à fournir à un récepteur une puissance électrique P, la tension à la station génératrice ne pouvant dépasser une valeur maxima E.

On a, dans ces conditions,

$$P = i\left(E - 2i\rho\frac{l}{s}\right). \qquad (5)$$

Dans un cas semblable, les équations (1) et (5) renferment les variables C, $s$ et $i$, et il y aura lieu de rechercher les valeurs de $i$ et de $s$ qui rendent C minimum. On trouvera ainsi que la densité de courant la plus économique dépend de la longueur de la canalisation.

Dans les installations temporaires, on cherche à réduire le plus possible le coût de premier établissement; ce qui conduit à adopter la densité la plus haute compatible avec l'échauffement des conducteurs.

476. — **Cas où le courant est variable.** — Nous avons supposé que le courant maximum de $i$ ampères circule pendant les $t$ heures au cours desquelles la ligne est utilisée. Mais, en pratique, le courant traversant une canalisation est souvent variable. Pour déterminer le courant moyen à admettre dans le calcul de la section, il faut estimer les divers courants de régime et les durées de leur passage.

Soient $i_1$, $i_2$, $i_3$, . . . les courants passant pendant des temps

$t_1$, $t_2$, $t_3$, . . . heures ; $r$ étant la résistance $2\rho\frac{l}{s}$ de la ligne, on a, en désignant par $i_m$ le courant moyen cherché,

$$(i_m)^2\, r\, t = i^2_1\, r\, t_1 + i^2_2\, r\, t_2 + i^2_3\, r\, t_3 + \ldots .$$

On estimera le carré moyen des intensités d'après les diagrammes donnant la variation du courant en fonction du temps pendant une journée ou pour une journée moyenne, si la durée d'utilisation des courants diffère d'un jour à l'autre. Des déterminations semblables, effectuées dans des stations de distributions d'électricité urbaines, ont donné pour le rapport entre le courant maximum et la racine carrée du carré moyen des intensités des nombres variant entre 2,34 et 3,41.

## APPAREILS DE SÉCURITÉ A INTRODUIRE DANS LES CANALISATIONS.

477. — **Coupe-circuits de sûreté.** — Afin d'éviter qu'un court-circuit n'échauffe les conducteurs au point de détériorer les isolants et de provoquer des dangers d'incendie, on peut intercaler en tout point de jonction entre des conducteurs d'inégales sections un fil ou une plaque de sûreté traversé par le courant et susceptible de fondre avant que celui-ci ait atteint une intensité dangereuse pour le conducteur le plus faible.

Le plomb et l'étain sont les métaux les plus employés pour la confection des fils fusibles. Le premier a l'inconvénient de s'oxyder à l'air sous l'influence de l'échauffement produit par le courant. L'étain n'est pas altéré dans les mêmes conditions, et, en outre, il fond à une température plus basse que le plomb. L'alliage plomb-étain, à 40 pour 100 en poids de ce dernier métal, est très employé. La section des coupe-circuits est déterminée de manière à ce qu'ils fondent lorsque le courant dépasse une intensité donnée. Le courant capable d'amener la fusion des fils se calcule parfois par la formule empirique suivante, due à M. Preece, dans laquelle $i$ exprime l'intensité du courant en ampères et $d$ le diamètre du fil en millimètres.

$$i = k\, d^{3/2}.$$

Pour le plomb $k = 10,8$ et pour l'étain $k = 12,8$.

Lorsque les conducteurs fusibles sont très courts ou n'ont pas une section circulaire, il convient de déterminer le courant qui amène la fusion par des expériences directes effectuées à l'aide de l'appareil de sûreté employé.

Les fils de sûreté doivent être enfermés dans des boites incombustibles. En outre, il est désirable de ménager un dispositif empêchant l'emploi d'un fil plus fort que ne le comporte le câble à protéger. Les ouvriers sont, en effet, tentés de placer des fils de sûreté trop gros de manière à ne pas être inquiétés par des interruptions de circuit. On enfermera, par exemple, le fil de sûreté dans une gaîne de plâtre, les deux contacts extérieurs à l'aide desquels se fait le raccord avec la canalisation ayant des écartements différents suivant les types de câbles à protéger.

La fig. 267 montre un coupe-circuit à lame de plomb que l'on insère entre des supports en relation avec les conducteurs et qu'on assujettit à l'aide de vis de serrage. La lame de plomb est soudée à deux pièces de cuivre servant à assurer le contact avec les supports.


Fig. 267.

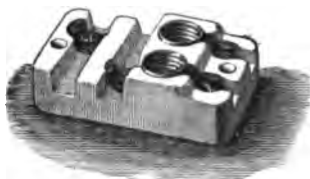

Fig. 268.


Fig. 269.

Pour les circuits traversés par des courants intenses, il est préférable de substituer aux fortes lames de plomb, dont la fusion entraîne des projections nuisibles, une série de fils d'étain disposés en dérivation. La fusion de ces fils s'opère successivement sans amener l'inconvénient signalé.

Les fig. 268 et 269 montrent des coupe-circuits Edison pour les branchements dérivés sur une conduite principale et traversés par des courants faibles. Les deux conducteurs principaux sont logés dans des rainures creusées dans une matière isolante et incombustible. Dans les branchements sont intercalées deux douilles Edison, et la continuité est établie par des fils fusibles logés

dans des bouchons à visser sur les douilles. Le remplacement d'un bouchon s'opère aisément lorsque le fil qu'il renferme est fondu.

Dans les circuits à haute tension, il convient d'employer des fils fusibles assez longs pour qu'il ne se produise pas d'arc permanent lors de la rupture du fil. On contrarie la formation de l'arc en entourant le conducteur fusible d'un tube en verre ou en ébonite. Dans le même but, on fait parfois passer le fil à travers des trous percés dans des cloisons isolantes.

Dans les installations intérieures et pour des courants d'une intensité modérée, on peut faire usage d'un coupe-circuit électromagnétique, tel que celui de M. Cunninghame, fig. 270. Le courant traverse un électro-aimant E, en passant par deux godets à mercure, réunis par l'intermédiaire de l'armature A et de deux



Fig. 270.

pièces courbes attachées à celle-ci. Lorsque l'intensité dépasse une valeur déterminée, l'armature est attirée et rompt le circuit. L'écartement entre l'armature et les pôles, qui limite le courant maximum, peut être varié aisément à l'aide d'une vis de réglage.

La fig. 271 montre les détails d'un coupe-circuit automatique imaginé par M. Dobrowolski. Les deux sections de conducteurs à relier aboutissent à deux paires de mâchoires à ressort qu'on peut réunir au moyen d'une lame de cuivre portée par un levier figuré à la gauche du dessin. Le couteau, qui est sollicité vers le bas par un ressort à boudin, se place entre les deux paires de mâchoires, où il

est retenu par un galet fixé à l'extrémité de l'armature d'un électro-aimant traversé par le courant. Cette armature, supportée par deux

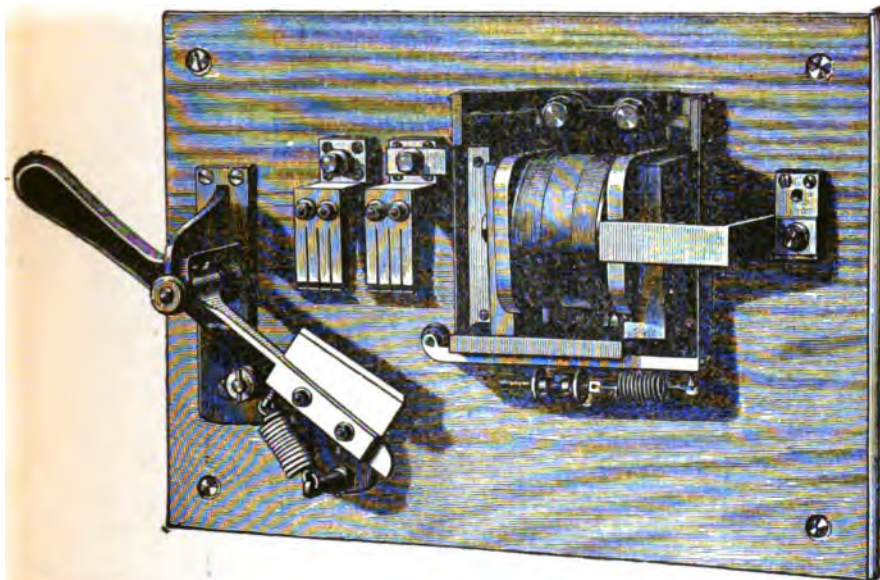


Fig. 271.

lames élastiques verticales, tend à se déplacer vers la droite de manière à fermer le circuit magnétique de l'électro-aimant. Un ressort à boudin supplémentaire, situé sous l'armature, permet de régler exactement la tension élastique qui s'oppose au déplacement.



Fig. 272.

Lorsque le courant dépasse une certaine intensité, le galet libère le levier et le circuit est interrompu.

Cette disposition évite les projections de mercure qui rendent

l'appareil de M. Cunninghame très incommode avec les courants intenses.

L'interrupteur à mâchoires, employé dans le système Dobrowolski, assure un excellent contact des pièces à réunir. La fig. 272 en montre un modèle employé par la Compagnie internationale d'électricité.

**478. — Parafoudres.** — Si une partie de circuit est aérienne, elle est exposée à recevoir des décharges atmosphériques et à amener dans les appareils, lampes ou machines, alimentés par la canalisation, un courant de haute tension susceptible de les détériorer. De même, lorsqu'un circuit aérien se raccorde à une canalisation souterraine, celle-ci peut être fortement endommagée par la décharge de l'électricité atmosphérique.

Afin d'éviter ces accidents, on protège les raccordements des lignes aériennes avec les câbles et les appareils par des parafoudres formés de deux plaques métalliques parallèles et très voisines dont l'une est reliée au circuit et l'autre à la terre. Lorsque la foudre tombe sur la ligne aérienne, la décharge franchit sous forme d'étincelle l'intervalle entre les deux plaques et se rend directement dans le sol. Parfois, on garnit les plaques de pointes disposées sur les faces en regard, en vue de faciliter l'écoulement de l'électricité atmosphérique. D'autres fois, on les sépare par une mince couche diélectrique, telle que du papier paraffiné, dont l'épaisseur est calculée pour resister à la tension des courants ordinaires de la ligne.

Pour protéger les câbles télégraphiques, on fait usage d'un parafoudre plus sensible dû à Varley. Dans une ampoule où l'on a fait un vide partiel pénètrent deux pointes de platine reliées, l'une à la terre, l'autre à la ligne. On règle le degré de vide de manière qu'une tension anormale provoque une décharge sous forme d'effluve.

On a employé au Burgenstock, en Suisse, un parafoudre complexe. Avant de gagner l'appareil terminal, le courant passe par l'une des plaques d'un parafoudre à pointes, puis par la bobine d'un électro-aimant dont la résistance est minime pour un courant continu, mais qui oppose au courant variable occasionné par la décharge atmosphérique une résistance apparente considérable. Le point de sortie de la bobine communique avec l'une des armatures d'un grand condensateur dont l'autre armature est à la terre. Par

ce système, les décharges faibles viennent se condenser sans atteindre la machine. Les fortes décharges se divisent : une partie s'écoule par le parafoudre à pointes, l'autre partie, qui a pu passer au delà, est condensée.

M. O. Lodge recommande également un parafoudre composé d'une série de pointes de décharge voisines d'une plaque de terre, entre lesquelles se trouvent des bobines à noyaux de fer. Les courants ordinaires traversent aisément ces bobines, tandis que celles-ci opposent une impédance notable aux courants de décharge qui s'échappent par les pointes intercalées entr'elles.

Dans certains cas, par exemple lorsqu'on emploie le retour par la terre, § 473, l'électricité produite à la station génératrice est dérivée par l'étincelle due à une décharge et cette dérivation tend à persister sous forme d'arc voltaïque entre les plaques du parafoudre. Lorsque chacune des lignes aboutissant à la machine génératrice est protégée par un parafoudre, cette machine peut être mise en court-circuit lorsque des étincelles de décharge éclatent simultanément dans les deux appareils de sûreté.

Pour éviter cet inconvénient, M. Elihu Thomson a imaginé l'ingénieuse disposition suivante. A l'endroit du parafoudre on intercale dans la ligne un électro-aimant en fer à cheval de résistance électrique assez faible pour ne produire qu'une chute de potentiel négligeable avec un courant ordinaire. Les deux pôles de

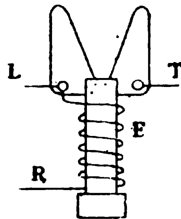



Fig. 273.

cet électro-aimant embrassent les deux plaques L, T du parafoudre dont l'écartement augmente rapidement à la partie supérieure. S'il se produit sur la ligne une décharge atmosphérique, la self-induction de l'électro-aimant oblige cette décharge à s'écouler sous forme d'étincelle entre les deux plaques.

Dans le cas où le courant du générateur est dérivé sous forme d'arc voltaïque, ce dernier est repoussé vers le haut par la réaction du champ magnétique des pôles de l'électro-aimant, dont les bobines sont enroulées de manière à produire la répulsion de ce courant dérivé. L'arc augmente ainsi progressivement de longueur et se rompt rapidement.

Dans beaucoup de cas, on emploie un interrupteur automatique qui coupe le circuit de la dynamo sous l'influence du courant traversant le parafoudre.

## SYSTÈMES DIRECTS DE DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

479. — Étant donné un ensemble d'appareils récepteurs, lampes, moteurs, accumulateurs, à alimenter par le courant électrique, on demande de les mettre en rapport avec un ou plusieurs générateurs de manière que chacun de ces appareils reçoive la quantité d'énergie nécessaire, tout en satisfaisant aux conditions d'économie et de sécurité.

Le problème se précise généralement par ce fait que les récepteurs à alimenter doivent être traversés par un courant constant ou être soumis à une différence de potentiel invariable.

480. — **Distribution en série.** — La manière la plus simple de résoudre le premier cas est de disposer les appareils les uns à la suite des autres de façon à former un seul circuit avec la source d'électricité. C'est là le système de distribution en série qui a l'avantage de réduire au minimum la section et, par suite, le prix des conducteurs employés, attendu que l'intensité du courant reste la même quel que soit le nombre des appareils alimentés. Ce dispositif permet, en outre, de placer le générateur en un point quelconque du circuit. Par contre, ce système établit une certaine solidarité entre les récepteurs et les expose à se dérégler lorsque l'un d'eux présente un défaut de fonctionnement. Une interruption en un point du circuit suspend la marche de tous les appareils.

Lorsque les récepteurs sont des lampes, pour éviter que l'extinction de l'une d'entr'elles n'amène celle des autres, un appareil

automatique met généralement la lampe en court-circuit lorsqu'elle cesse de fonctionner ou y substitue une lampe de réserve. D'autre part, on se met à l'abri d'une extinction complète des foyers par une interruption dans la canalisation, en disposant les lampes en deux séries alimentées par des générateurs indépendants et en intercalant les lampes consécutives ou voisines alternativement dans l'une et dans l'autre série.

Le système de distribution en série conduit à des tensions élevées et, par suite, dangereuses, lorsque les appareils alimentés sont très nombreux, car les tensions aux bornes des appareils s'ajoutent à la chute en volts dans la canalisation pour donner aux bornes des générateurs une différence de potentiel considérable.

Le système de distribution en série n'est pas économique quand le nombre des récepteurs en circuit est très variable, parce que la dynamo fonctionne alors avec un mauvais rendement pendant une partie du temps. Il ne peut être question d'accoupler des dynamos en tension à mesure que la consommation d'énergie s'accroît, car l'addition d'une machine nécessiterait l'interruption momentanée du circuit.

On a vu, §§ 348 et 411, les dispositifs employés le plus fréquemment pour maintenir le courant constant dans le circuit quel que soit le nombre des récepteurs en service.

481. — **Distribution en dérivation.** — Une deuxième méthode simple de liaison entre le générateur et les récepteurs consiste à disposer ceux-ci en dérivation, à l'aide de ***branchements*** raccordés aux ***conducteurs de distribution*** ou ***distributeurs***, fig. 274.

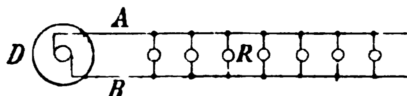



Fig. 274.

Ce mode d'alimentation des récepteurs leur assure l'indépendance qui leur manquait dans le système précédent. Un des appareils peut être interrompu sans occasionner l'arrêt des autres. Mais cette indépendance n'est obtenue qu'au prix d'un accroissement considérable de la section des câbles venant de la source d'élec-

tricité, attendu que le courant à produire par celle-ci augmente proportionnellement au nombre des récepteurs.

Afin de réduire la section de cuivre des conducteurs, on est conduit à adopter des récepteurs fonctionnant sous une *tension*, ou *voltage*, aussi élevée que le permettent la nature des appareils et la sécurité des personnes. En effet, pour une quantité donnée d'énergie à transmettre, l'intensité du courant et, par suite, la section économique des conducteurs, sont en raison inverse de la tension de distribution, § 475.

Indépendamment des conditions de sécurité et d'économie à observer dans l'étude d'une distribution, il y a une troisième condition qui joue un rôle important, particulièrement lorsqu'il s'agit d'alimenter des lampes ; on exige que la tension appliquée à celles-ci reste comprise entre des limites très voisines, quel que soit le nombre des foyers en activité. Pour les lampes à incandescence, la différence de potentiel ne peut varier de plus de 1,5 à 2 pour 100 en deçà et au delà du voltage normal.

Or, si l'on suppose que la tension est maintenue constante aux bornes de la machine génératrice, il est clair que le voltage décroît dans les conducteurs principaux à mesure qu'on s'éloigne de la source, la perte en volts entre deux points quelconques de la canalisation étant égale à la somme des produits des résistances des tronçons compris entre ces points par les courants correspondants. En outre, chaque fois qu'on allume ou qu'on éteint un des foyers, la tension varie aux bornes des autres foyers.

Désignons par $i_1$, $i_2$, $i_3$, . . . . , $i_n$ les courants dérivés dans les branchements successifs à partir de la source; par $r_1$, $r_2$, $r_3$, . . . . , $r_n$ les résistances des doubles sections de canalisation comprises entre le générateur et les branchements. La chute de tension au branchement d'ordre $n$ est donnée par

$$\begin{aligned} v &= r_1 (i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n) + (r_2 - r_1)(i_2 + i_3 + \dots + i_n) \\ &\quad + \dots + (r_n - r_{n-1})\, i_n \\ &= r_1 i_1 + r_2 i_2 + \dots + r_n i_n. \end{aligned}$$

Il est facile de calculer directement la différence des tensions appliquées à deux récepteurs quelconques. A titre de curiosité, on remarquera que l'expression de la chute de tension est analogue à celle de la somme des moments de forces égales à $i_1$, $i_2$, . . . . $i_n$,

échelonnées sur une droite, par rapport à un point de cette droite dont elles seraient séparées par des distances $r_1, r_2, \ldots r_n$. On peut donc, ainsi que l'a montré M. Krieg ([1]), résoudre le problème par les procédés de la graphostatique.

Dans une installation importante, il conviendra de calculer les conducteurs principaux en ayant égard aux règles de sécurité et d'économie, §§ 474 et 475. La règle de Thomson conduit à adopter une densité uniforme de courant et à donner des sections décroissantes aux tronçons successifs à mesure qu'on s'écarte de la source. On arrive de la sorte à une distance limite au delà de laquelle la chute de tension dépasse la variation compatible avec la bonne marche des récepteurs. Cette limite est rapidement atteinte avec les lampes à incandescence qui ne souffrent pas de variations supérieures à 2 pour 100 de la tension normale.

**482. — Distribution en boucle.** — Dans une installation de peu d'étendue, comme celle destinée à l'éclairage d'une maison ou d'un appartement, on emploie souvent un mode de distribution, dit *en boucle*, qui permet de réduire notablement les différences des tensions maintenues aux lampes et, par suite, d'agrandir la zône desservie sans dépasser les limites de variation fixées. Comme le montre la fig. 275, la longueur de conducteur principal intéressée dans le

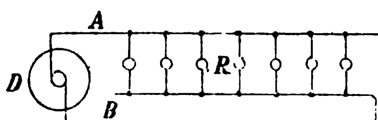



Fig. 275.

circuit de chaque lampe est invariable. Si donc on calcule les conducteurs de manière que la densité de courant soit constante quand toutes les lampes sont allumées, ce qui conduit à des conducteurs dont les sections décroissent à partir de la source, la tension sera uniforme en tous les points, car le système revient à donner à

([1]) M. Krieg, *Die Erzeugung und Verteilung der Elektricität in central stationen*, 1888.

chaque lampe un circuit spécial de longueur invariable et à réunir les branches parallèles des circuits. Mais si l'on éteint une partie des foyers, la densité de courant ne reste plus constante, et l'on constate des variations de tension, ce qui n'arriverait pas si chaque lampe était réellement alimentée par deux conducteurs branchés directement sur la source.

Lorsque les récepteurs s'écartent progressivement de la source d'électricité, la distribution en boucle exige une dépense de conducteurs plus grande que la distribution simple. Mais si les récepteurs

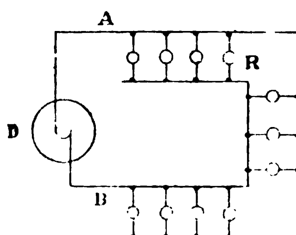



Fig. 276.

forment une figure fermée, comme c'est le cas dans une distribution destinée à alimenter un bloc de maisons circonscrit par des rues, la fig. 276 montre qu'on peut réaliser la distribution en boucle sans accroissement de dépense.

483. — **Distribution par réseau et feeders.** — On vient de voir que la condition de ne pas dépasser une perte de tension déterminée limite en général à une faible longueur la distance à laquelle une source d'électricité peut alimenter des lampes à incandescence. Pour accroître le rayon de distribution, on pourrait employer un procédé analogue à celui qu'on applique dans les distributions de gaz, où l'on fait varier la pression aux becs par une clef ou un régulateur automatique, lorsque la pression change dans les conduites. De même des résistances pourraient être intercalées à la suite des lampes électriques et variées à la main ou automatiquement de manière à régulariser la tension utile. Dans le cas de courants alternatifs, l'emploi des bobines à réaction permet de modifier la tension utile sans grande dépense d'énergie, § 446. Mais ces moyens introduisent une complication et une perte

d'énergie en chaleur qu'on évite par le procédé suivant. On établit un réseau de câbles distributeurs D auxquels se raccordent les branchements alimentant les récepteurs *b*. Des machines

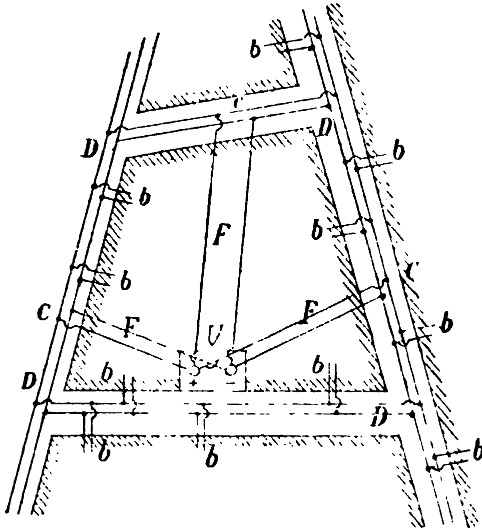



Fig. 277.

génératrices partent un certain nombre de conducteurs F appelés *feeders* ou *artères* qui déversent l'énergie électrique dans le réseau en des points C nommés *centres de distribution* ou *boites de jonction*.

Au lieu de maintenir la tension constante à la station génératrice, on l'y fait varier de manière à obtenir une différence de potentiel constante aux centres de distribution, ce dont on s'assure par des fils spéciaux, appelés *fils pilotes*, qui reviennent de ces centres vers des voltmètres placés dans l'usine productrice. Vu la grande résistance des voltmètres, on peut donner aux fils pilotes une section minime, sans crainte d'y provoquer une chute de tension sensible.

Grâce à l'artifice qu'on vient de voir, il est possible d'étendre considérablement le rayon de la zône desservie par une usine électrique, car on satisfait à la condition d'uniformité de tension aux récepteurs en multipliant autant qu'il est nécessaire les centres de distribution et l'on peut calculer les feeders de manière à obtenir la *densité moyenne* la plus économique, § 475.

Dans une distribution destinée à l'éclairage d'un quartier de ville, on espacera les centres de distribution de manière à ne pas dépasser les variations de tension admises. On tolérera, par exemple, une perte de potentiel de 2 pour 100 dans les distributeurs et de 1 pour 100 dans les branchements placés à l'intérieur des habitations. Le plus grand écart entre les tensions extrêmes est alors de 3 pour 100. Les feeders, au contraire, pourront présenter des chutes de tension bien supérieures et d'autant plus grandes que la force motrice est à meilleur compte.

On cherche à former avec les câbles distributeurs des figures fermées afin que, si la communication avec les feeders vient à être rompue accidentellement en un point, l'énergie électrique arrive aux récepteurs par les côtés de la figure qui restent reliés à l'usine électrique. Ces figures fermées forment les mailles d'un réseau qui couvre l'agglomération à desservir.

484. — **Systèmes de distribution mixtes.** — On peut combiner de diverses manières les systèmes de distribution en série et en dérivation, de manière à bénéficier de certains avantages appartenant à ces procédés.

Ainsi une combinaison très usitée avec les lampes à arc voltaïque consiste à dériver, par rapport à des conducteurs A, B, fig. 278, des groupes de lampes disposées en série. Outre l'avantage spécial de réduire les résistances additionnelles qu'exigent les lampes à arc, cette combinaison permet de diminuer la section des câbles distributeurs puisqu'elle se prête à un accroissement de la tension de

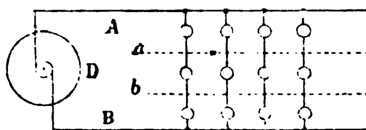



Fig. 278.

distribution. Par contre, elle établit une certaine solidarité entre les lampes d'une même série, et elle oblige à munir chaque récepteur d'un appareil qui y substitue automatiquement, en cas d'extinction ou d'arrêt, un récepteur de réserve ou une résistance qui en tient lieu.

Pour éviter que l'interruption d'un des récepteurs n'arrête le fonctionnement des appareils en série avec lui, on peut dans certains cas disposer des câbles intermédiaires *a*, *b*, qui réunissent les fils de jonction des récepteurs semblablement placés. Mais cette disposition n'empêche pas la tension aux bornes des appareils de subir des variations qui, dans le cas de lampes, sont préjudiciables au bon fonctionnement. On verra toutefois, § 487, qu'il est possible de remédier à ces variations par des régulateurs spéciaux.

**485. — Système de distribution à conducteurs multiples. —** M. J. Hopkinson est arrivé à assurer l'indépendance complète des divers récepteurs en associant des dynamos en tension et en reliant les câbles intermédiaires des divers groupes de récepteurs aux pôles communs des machines. Soit le cas de deux dynamos en série, indiqué dans la fig. 279. Si tous les récepteurs sont égaux et fonc-

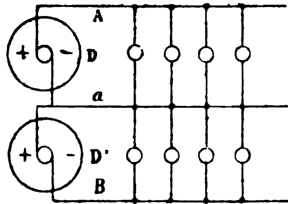



Fig. 279.

tionnent simultanément, aucun courant ne traverse le conducteur intermédiaire *a*. Si tous les récepteurs situés d'un même côté de *a* sont interrompus, c'est l'un des conducteurs extrêmes qui devient passif, le conducteur *a* étant parcouru par un courant égal à celui qui traverse les conducteurs A et B dans le premier cas.

Cette combinaison permet, comme on le voit, de doubler la tension de distribution en conservant aux bornes des récepteurs la même différence de potentiel et en assurant à ceux-ci la même indépendance que dans le cas d'une distribution simple en dérivation.

Mais le fait de doubler la tension entre les conducteurs extrêmes a permis de réduire de moitié l'intensité du courant d'alimentation. Par suite, si l'on admet que les trois conducteurs ont les mêmes sec-

tions, et si la densité, calculée d'après la règle de Thomson, reste invariable, il y aura une économie d'un quart dans le poids de cuivre employé. En réalité, l'économie peut devenir plus grande si l'on étudie les groupements de manière que les récepteurs en activité des deux côtés du conducteur intermédiaire soient toujours en nombres égaux ou à peu près. On peut, dans ce cas, réduire sans crainte la section du conducteur intermédiaire de moitié, ce qui donne définitivement une économie de 37,5 pour 100.

Si l'on n'envisage que la perte de charge dans les conducteurs, au lieu de se baser sur la règle économique de Thomson, il est possible d'arriver à une réduction du poids de cuivre bien plus considérable.

En effet, à densité de courant égale, lorsque le conducteur intermédiaire est passif, la chute de tension pour cent est moitié moindre que dans le système à deux conducteurs. Par suite, pour une même chute de tension relative, on peut doubler la densité de courant, c'est à dire diminuer les sections de 50 pour 100. Au lieu d'obtenir, pour le système à trois conducteurs d'égales sections, un poids de cuivre égal aux trois quarts du poids nécessité par le système à deux conducteurs, on arrive seulement aux trois huitièmes, ce qui procure une réduction de cinq huitièmes, ou 62,5 pour cent. La réduction est encore accrue si l'on restreint la section du conducteur intermédiaire.

Mais il faut, pour réaliser ces réductions, que les deux groupes en série contiennent des nombres sensiblement égaux de récepteurs. Si l'un des groupes est interrompu, tandis que tous les récepteurs de l'autre groupe sont en activité, la chute de tension relative est doublée. En outre, l'économie faite sur les conducteurs entraîne une perte d'énergie en chaleur plus forte que si l'on avait calculé les sections par la règle de Thomson, dont l'application est indispensable pour que la somme des frais d'exploitation soit minima.

Il est facile de généraliser les déductions précédentes. S'il y a $n$ groupes de récepteurs, on peut former $n$ circuits dérivés par rapport à $n$ dynamos réunies en quantité, ou bien associer les dynamos en série en supprimant $n - 1$ conducteurs, les câbles intermédiaires devenant communs à deux circuits.

Le nombre des conducteurs, qui était $2n$, est devenu $n + 1$, d'où une réduction du poids de cuivre dans le rapport $\frac{n+1}{2n}$, dans l'hypothèse où les conducteurs intermédiaires ont une section

égale à celle des conducteurs extrêmes et où ces sections sont calculées par la règle de Thomson.

Au point de vue de la chute de tension relative, on remarque que celle-ci est diminuée dans le rapport $\frac{1}{n}$, puisque la tension totale est $n$ fois plus grande. Pour arriver à la même chute de tension relative que précédemment, la section de cuivre doit devenir $n$ fois plus faible dans le système multiple.

Le rapport des poids est alors $\frac{n+1}{2n^2}$ et la réduction du poids de cuivre devient

$$100\left(1-\frac{n+1}{2\,n^2}\right)\text{pour } 100.$$

Le système multiple est généralement associé avec la distribution par feeders, de manière à permettre l'extension de la zone de distribution sans dépasser une chute de tension donnée.

**486. — Égalisateurs de tension de M. Elihu Thomson. —** Diverses combinaisons ont été suggérées pour arriver à alimenter un réseau à conducteurs multiples à l'aide d'un seul groupe de générateurs, reliés en dérivation, donnant la tension requise entre les conducteurs extrêmes, fig. 278. Il suffit alors de deux séries de feeders pour relier les conducteurs extrêmes aux générateurs et les conducteurs intermédiaires n'existent que dans le réseau de la distribution.

M. E. Thomson préconise l'emploi d'un réseau à 3 conducteurs pourvu d'un dispositif special pour maintenir la tension constante dans chacun des groupes de récepteurs. Il intercale, entre les distributeurs extrêmes, deux dynamos auxiliaires dont les induits sont reliés en série et montés solidairement sur le même axe. Ces enroulements induits sont pourvus d'inducteurs communs dérivés également sur les conducteurs extrêmes. Les pôles communs des deux induits communiquent avec le distributeur intermédiaire. Cela étant, si les tensions sont égales dans les groupes de récepteurs, c'est à dire si le distributeur intermédiaire est passif, les induits des dynamos sont traversés par des courants égaux et se mettent à tourner comme moteurs électriques, jusqu'à engendrer une force contre-électromotrice sensiblement égale à la tension appliquée

aux balais. Dans ces conditions, le courant absorbé par les induits est minime.

Si l'on interrompt des récepteurs dans l'un des groupements, la tension correspondante s'accroît et le courant augmente à travers l'induit appartenant au même groupe. Ce fait détermine un accroissement de vitesse de l'arbre commun et, par suite, une augmentation de la force électromotrice produite par l'induit voisin. Si cette force électromotrice est supérieure à la différence de potentiel appliquée aux bornes de ce dernier induit, celui-ci fait l'office de générateur et envoie un courant dans les récepteurs du même groupe, ce qui relève la différence de potentiel aux bornes de ceux-ci. Grâce à cette ingénieuse combinaison, l'énergie absorbée par l'un des induits est restituée en grande partie par l'induit voisin. Les égalisateurs de tension tournent nécessairement dans le même sens, comme générateurs et comme moteurs, à cause de l'excitation en dérivation.

487. — **Systèmes Siemens.** — On doit à M. Siemens d'autres solutions de la distribution par conducteurs multiples permettant de n'employer, à la station productrice, qu'un seul générateur ou un groupe de générateurs réunis en dérivation.

La fig. 280 montre un système de réseau à 4 distributeurs *a b c d* disposés dans les rues d'une agglomération et reliés à des branchements H dérivés vers les habitations. Des deux pôles $C_-$, $C_+$ du générateur ou du groupe de générateurs disposé dans l'usine électrique partent deux séries de feeders se raccordant en des points *x* et *y* aux distributeurs extrêmes.

Les feeders sont donc établis comme dans le système à deux fils. Pour maintenir la tension constante entre les distributeurs consécutifs, on a intercalé, en divers points du réseau, des groupes de régulateurs R, dont la fonction est de compenser les variations de tension dues à la mise en activité de nombres inégaux de récepteurs dans les divers branchements.

Dans ce but, entre deux distributeurs successifs tels que *a* et *b*, fig. 281, on intercale d'une part la bobine R d'un relais et d'autre part une série de résistances en dérivation W. Toutes celles-ci communiquent d'une manière permanente avec le branchement A, mais la liaison avec le branchement B s'opère par un contact mobile

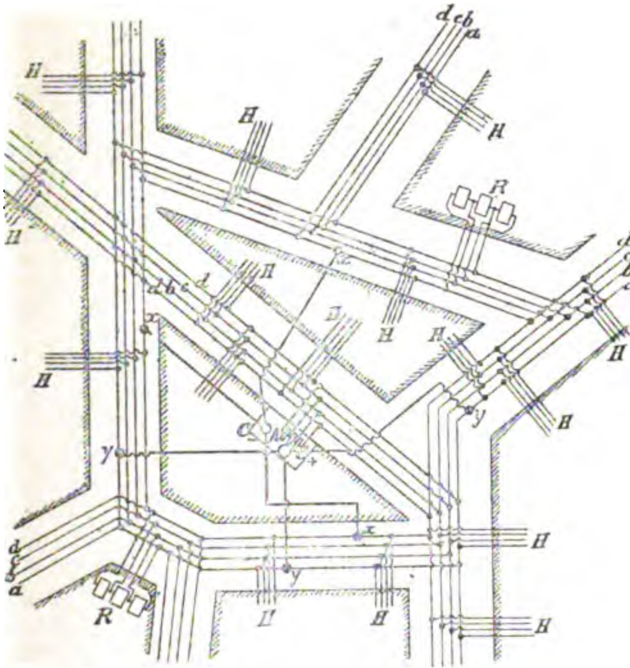


Fig. 280.

sur l'axe du secteur K, ce qui permet de varier le nombre des résistances dérivées par rapport à A et B.

Le secteur K est mû par les noyaux $N^1$, $N^2$, réunis par une corde enroulée autour d'une poulie fixée sur l'axe de K. $N^1$ et $N^2$ sont attirés par des solénoïdes $S^1$, $S^2$.

Si la tension croît entre les branchements A et B, le relais R attire l'armature U, qui est sollicitée en sens inverse par un ressort de suspension F. Un courant partant de B traverse le solénoïde $S^2$ et retourne en A par F et $s'$. Le noyau $N^2$ est attiré et des résistances W sont ajoutées en dérivation de manière à provoquer une chute de tension.

Si, au contraire, la tension diminue en deçà de la valeur normale, la lame F appuie l'armature contre le buttoir $s^2$. Le courant issu de B traverse le solénoïde $S^1$, le noyau $N^1$ est attiré et des résistances W sont retirées du circuit jusqu'à ce que la différence de

potentiel ait repris la valeur normale et que l'armature U soit revenue à égales distances des deux buttoirs $s^1$, $s^2$.

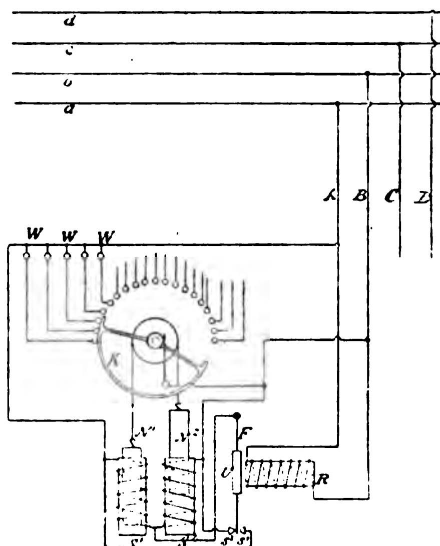



Fig. 281.

Comme on le voit, dans ce système, on n'arrive à égaliser les tensions entre les distributeurs successifs qu'en provoquant une absorption artificielle d'énergie électrique.

M. Siemens a également utilisé des égalisateurs de tension analogues à ceux de M. E. Thomson, en vue de récupérer la majeure partie de l'énergie absorbée pour la régularisation. La fig. 282 montre le schéma du système appliqué à la distribution à 5 conducteurs qui fonctionne au secteur de Clichy, à Paris. Dans un champ inducteur, dont les bobines sont reliées aux conducteurs extrêmes, 4 armatures à anneau sont disposées sur un même axe et

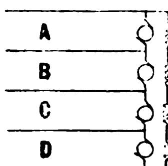



Fig. 282.

intercalées dans les quatre groupes de conducteurs A, B, C, D. Ces armatures ont une résistance intérieure très minime et elles tournent, par la réaction du courant qui les traverse, en engendrant des forces contre-électromotrices sensiblement égales aux différences de potentiel appliquées au balais. Si les récepteurs utilisés dans les quatre groupes,sont en nombre égaux, les tensions appliquées aux induits sont les mêmes et ceux-ci développent des forces électromotrices identiques en n'absorbant que la quantité d'énergie très minime nécessaire pour vaincre leurs frottements. Mais si le nombre des récepteurs intercalés dans l'un des groupes, B par exemple, diminue, la tension augmente dans ce groupe, la vitesse de l'induit correspondant s'accroît et, comme toutes les armatures sont solidaires, les induits voisins sont entraînés à développer des forces électromotrices supérieures aux tensions appliquées à leurs bornes et, par suite, à restituer à leurs groupes respectifs la plus grande partie de l'énergie électrique devenue disponible dans le groupe B. En d'autres termes, les induits des groupes A, C, D font office de générateurs et, sous l'action du moteur B, développent chacun une énergie électrique sensiblement égale au tiers de l'énergie absorbée par l'armature de B.

Suivant les indications qui nous ont été données par M. le Dr Pirani, la station de Clichy peut alimenter 6 000 lampes à incandescence dans un rayon de 3 kilomètres avec 3 postes de régulateurs seulement, chaque machine compensatrice étant capable de corriger un écart de 50 ampères entre le débit des divers groupes. Les écarts ne dépassent jamais cette limite lorsqu'on a soin de répartir les lampes de chaque abonné important sur plusieurs de ces groupes.

488. — **Réseaux électriques.** — Le système de distribution par feeders sert ordinairement de base à l'établissement des réseaux électriques, lorsqu'on doit alimenter directement les lampes et les électromoteurs d'une agglomération à l'aide du courant engendré dans une ou plusieurs usines électriques.

Les récepteurs sont groupés en dérivation par rapport à deux ou plusieurs conducteurs de distribution, entre lesquels les variations de tension ne doivent pas dépasser certaines limites, par exemple 1,5 pour 100 de la tension normale dans le cas de lampes à incan-

descence. Les conducteurs du réseau de distribution longent les rues et sont raccordés entr'eux de manière à former des figures fermées ; de la sorte chaque récepteur communique avec les générateurs par deux voies différentes au moins, ce qui diminue les chances d'extinction ou d'arrêt lors d'une interruption dans le réseau.

De l'usine électrique partent les faisceaux de feeders qui se raccordent aux distributeurs en des points choisis de manière à maintenir la tension dans tout le réseau entre les limites prescrites.

En vue de faciliter la pose, on donne souvent aux distributeurs une section uniforme dans une rue et l'on choisit la position des raccords avec les feeders de manière à ce que, sous la charge maxima, la chute de tension n'excède pas la valeur admise. Les raccords des feeders se font, de préférence, aux croisements de rues. Il est bon de multiplier ces raccords en vue de diminuer la dépense de cuivre dans le réseau. Pour une perte de charge donnée, le poids des distributeurs varie à peu près en raison inverse du nombre des feeders. Le poids de ceux-ci est d'ailleurs à peu près indépendant de leur nombre, puisque la quantité totale d'électricité qui les traverse est constante. On compte de 15 à 30 feeders dans un réseau à 110 volts s'étendant sur 0,5 $km^2$.

Dans une canalisation semblable, il convient que toutes les branches dérivées soient protégées par des coupe-circuits fusibles en chaque point par où peut arriver le courant. Un feeder, par exemple, sera terminé par des conducteurs fusibles à ses deux extrémités, car, si un court-circuit se déclare en un de ses points, le courant afflue par les deux bouts vers l'endroit défectueux. Les deux coupe-circuits fondent et isolent le feeder.

La distance à laquelle les feeders peuvent s'écarter de l'usine centrale dépend de la différence entre le prix de vente et le prix de revient de l'énergie électrique. Il est évident qu'à mesure que les feeders s'allongent la somme des frais résultant de l'énergie perdue et de l'intérêt et amortissement des conducteurs s'accroît. On atteint ainsi une limite à partir de laquelle le bénéfice de l'exploitation devient insuffisant.

Pour une même perte de charge, le poids des conducteurs est proportionnel au carré de la longueur de ceux-ci.

M. Rechnewski a calculé qu'à raison d'une perte de charge moyenne de 5 pour 100 et d'un poids de 5 kg. de cuivre par lampe

de 40 watts sous 110 volts, la longueur maxima des feèders est 700 m. Pour porter cette longueur à 1 000 m., il faut sacrifier 10 kg. de cuivre par lampe. Dans les mêmes conditions, les rayons d'action d'une distribution à 3 conducteurs seraient respectivement 1 200 et 1 700 m. et ceux d'une distribution à 5 conducteurs 2 400 et 3 500 m.

**489. — Emplacement le plus favorable d'une usine d'électricité.** — M. L'Hoest [1] s'est proposé de rechercher la position la plus favorable d'une usine d'électricité destinée à alimenter des foyers lumineux en dérivation. Il suppose que les conducteurs rayonnent en lignes droites à partir de l'usine et que la perte de charge $e$ est constante dans les divers circuits. En appelant $2l$, $2l'$, $2l''$ .... les longueurs de ceux-ci, $i$, $i'$, $i''$ .... les intensités des courants qui les traversent, on voit sans peine que le poids des conducteurs est exprimé par

$$P = 4\frac{\rho d}{e}\Sigma l^2 i,$$

où $\rho$ est la résistance spécifique du métal conducteur et $d$ sa densité.

Cette expression est de la forme de celle du moment d'inertie polaire, par rapport à la position de l'usine, de masses supposées égales à $i$, $i'$, $i''$... et appliquées aux points où se trouvent les foyers. Or, le moment d'inertie d'un tel système de masses actives est minimum quand le point auquel il se rapporte est le centre de gravité du système; ce qui montre d'emblée la meilleure position à donner à l'usine.

Souvent des considérations d'ordre pratique empêchent de disposer l'usine au centre de gravité ainsi déterminé, mais on connaît divers emplacements qui se prêtent à recevoir les générateurs. On arrêtera le choix entre ces emplacements en remarquant que le moment d'inertie par rapport à un point situé à une distance R du centre de gravité est égal au moment d'inertie par

---

(1) *Bulletin de l'Ass. des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore,* 9 février 1890.

rapport à ce dernier augmenté de $R^2 \Sigma i$. Il est par suite évident que le point le plus favorable sera le plus rapproché du centre de gravité, et l'expression précédente permet de déterminer immédiatement le surplus de dépense de cuivre occasionné par le recul de l'usine à une distance R du point le plus favorable. On a, en effet, en désignant par $\Omega$ le moment d'inertie minimum et par I le courant total

$$P = \frac{4 \rho d}{e} (\Omega + R^2 I). \quad (1)$$

Si l'on considère comme variables R et P, cette équation représente une parabole.

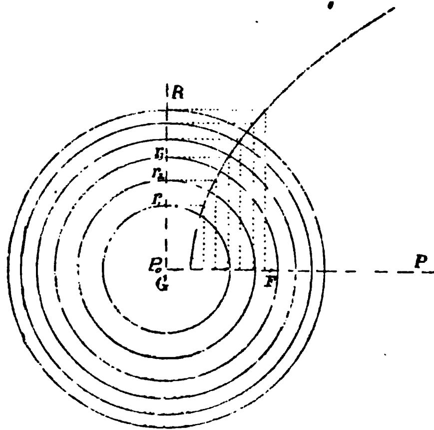


Fig. 283.

On conclut de ce qui précède que les emplacements donnant lieu à d'égales dépenses de cuivre sont situés sur des circonférences tracées du centre de gravité comme centre. Les dépenses de cuivre croissent comme les abscisses d'une parabole dont les ordonnées représentent les distances au centre de gravité, fig. 283.

M. L'Hoest a fait remarquer que les considérations précédentes trouvent particulièrement leur application pour les usines destinées à alimenter les lampes à arc éclairant les chantiers et les gares, où les conducteurs se posent généralement sur poteaux

et autant que possible en lignes droites. Cependant la formule (1) peut fournir des indications utiles sur les valeurs relatives des emplacements convenant à une usine centrale qui doit alimenter un réseau à deux ou plusieurs conducteurs au moyen de feeders.

**490. — Modes d'emploi des feeders. Réglage de la tension utile.** — Les diverses parties d'un quartier desservies par une usine électrique et inégalement distantes de cette dernière sont alimentées par des feeders. Si les courants sont sensiblement égaux dans les divers feeders, il résulte de l'inégalité de longueur de ces derniers des chutes de potentiel différentes. Si donc on raccordait entr'elles les extrémités des feeders aboutissant à l'usine, on ne pourrait relier ensemble que les groupes de récepteurs également éloignés des générateurs. Les zônes rattachées à des faisceaux de feeders différents fonctionneraient alors sous des tensions qui varieraient en sens inverse de la longueur de ceux-ci.

Mais on préfère régler tous les récepteurs pour la même tension de manière à pouvoir raccorder les distributeurs des diverses zônes. Il est nécessaire dans ce cas de faire varier la tension initiale appliquée aux feeders avec la chute de potentiel dans ceux-ci.

Trois méthodes sont applicables.

La première consiste à ne raccorder entr'eux que les feeders qui donnent lieu à une même chute de tension et à employer des générateurs ou des groupes de générateurs distincts pour alimenter chacun de ces faisceaux de conducteurs.

Le second procédé, beaucoup plus employé, consiste à unifier la chute de tension dans tous les feeders, en intercalant à la suite des plus courts des résistances artificielles formées de bandes de nickeline et disposées à l'usine centrale. Ce moyen permet d'associer en dérivation tous les générateurs de la station électrique, ce qui simplifie les manœuvres ; mais, par contre, les résistances introduites donnent lieu à une perte d'énergie électrique. La tension à l'usine doit être accrue à mesure que l'intensité croissante du courant augmente la perte dans les artères.

Le calcul de la chute de tension dans les feeders se fait dans l'hypothèse où ceux-ci sont traversés par le courant maximum. Si les variations de courant produites par la mise en activité des récepteurs ne suivent pas la même progression dans les diverses

directions, il pourra y avoir des inégalités dans les pertes de charge ; mais généralement les différences sont peu importantes, lorsque le groupement des récepteurs a été bien étudié. Si les écarts sont trop grands, on peut laisser dans les artères des rhéostats qu'on règle de temps en temps dans le but d'égaliser les chutes de potentiel.

Un troisième procédé permet de maintenir la tension constante à la fois à l'usine et dans le réseau. Il consiste à multiplier les feeders d'égale résistance. Aux heures où la charge est faible, on supprime la plus grande partie de ces artères qu'on utilise ensuite au fur et à mesure des besoins de la consommation, de manière à maintenir constante la chute de tension dans les feeders. La Compagnie Edison emploie 30 à 40 artères par usine centrale ; chaque croisement de rues présente une boîte de jonction.

Ce système donne un rendement inférieur au précédent, attendu qu'il occasionne une chute de tension uniforme pendant la journée entière, alors que, si l'on maintient tous les feeders en charge, la tension à l'usine n'atteint la valeur maxima qu'aux heures de fort débit.

Lorsque le rayon de l'agglomération à desservir est étendu, on multiplie les usines électriques en les disposant, autant que possible, au milieu des quartiers à alimenter. Souvent on raccorde entr'eux les réseaux de distribution de ces divers quartiers, ce qui permet à une seule usine d'alimenter l'agglomération entière aux heures de la journée ou de la nuit où la demande d'énergie électrique est faible. A ces moments, la chute de potentiel dans l'ensemble des réseaux est minime et la tension présente une uniformité suffisante dans la canalisation.

On a vu que la tension aux points où les feeders se raccordent avec les distributeurs est indiquée à l'usine centrale par le moyen des fils pilotes qui reviennent des boîtes de jonction vers des voltmètres placés à proximité des générateurs. Lorsque plusieurs feeders ont une origine commune, leurs fils pilotes se réunissent au même voltmètre, qui indique ainsi la tension moyenne des jonctions correspondantes, si l'on a soin d'égaliser, par des résistances additionnelles, les résistances des divers fils pilotes, et si l'on emploie un voltmètre d'une résistance très grande relativement à celle de ces fils. Ces résistances additionnelles, qui n'ont que quelques ohms,

sont nécessaires pour empêcher les fils d'être brûlés en cas d'écart anormal entre les tensions aux boîtes de jonction.

Les fils pilotes peuvent être reliés, avec avantage, aux distributeurs entre les boîtes de jonction, aux points où la chute de tension est maxima.

On peut éviter l'emploi des fils pilotes, dont la pose entraîne certaines complications, en estimant la chute de tension dans les feeders d'après l'intensité du courant qui les traverse. L'ampèremètre placé à l'origine d'un feeder de résistance $r$ peut être gradué de manière à indiquer directement la chute de potentiel $ir$. On déduit de cette dernière la tension à réaliser aux bornes des générateurs. Ce procédé exige deux lectures, l'une à l'ampèremètre, l'autre au voltmètre relié aux dynamos.

On supprime l'une des lectures par l'emploi d'une méthode différentielle : un voltmètre est pourvu de deux enroulements également éloignés de l'aimant mobile et agissant en sens inverses sur celui-ci. Un premier circuit formé de fil fin est relié directement aux bornes des générateurs. Le second circuit comprend une simple spire de fil traversée par le courant total qui s'écoule par le feeder. Lorsque ce courant est nul, la déviation de l'aimant indique la tension aux générateurs, identique alors à celle des points de raccord du feeder avec le réseau. Si le courant croît, la déviation de l'aiguille tend à diminuer. Pour la maintenir constante, il faut augmenter la tension aux générateurs, de manière que l'accroissement d'action du fil fin compense l'action de l'enroulement à gros fil. Le réglage consiste donc à modifier la tension des générateurs jusqu'à ce que l'aiguille revienne à la position initiale.

**491. — Positions des raccords des feeders avec le réseau.** — La désignation des points de raccord des feeders avec le réseau donne lieu à des calculs, souvent très laborieux, basés sur les lois de Kirchhoff. On suppose, pour simplifier le problème, que les conducteurs de retour sont remplacés par la terre et que la résistance de cette dernière est nulle. Pour obtenir la perte de tension réelle, on doit alors admettre que la résistance des divers conducteurs du réseau est doublée.

Le problème est ainsi amené dans la plupart des cas à l'énoncé suivant. On donne un distributeur dont les extrémités sont main-

tenues à une tension constante par les feeders et sur lequel sont échelonnés des branchements parcourus par des courants connus $i_1, i_2, i_3, \ldots, i_n$. Les tronçons du distributeur limités par les points de dérivation ont des résistances respectivement égales à $r_1, r_2, r_3, \ldots, r_{n+1}$. On demande la perte de charge maxima dans le distributeur.

Soient $I_1, I_2, I_3, \ldots, I_{n+1}$ les intensités inconnues des courants dans les tronçons successifs. Il existe un branchement qui reçoit le courant à la fois par les deux extrémités du distributeur. Ce point de partage est souvent indiqué approximativement par la répartition des récepteurs. On se le donne par hypothèse, ce sera le branchement $i_3$ par exemple, et l'on en déduit le sens des courants I. On applique la première loi de Kirchhoff aux divers branchements et l'on obtient successivement

$$I_1 - I_2 = i_1, \quad (1)$$
$$I_2 - I_3 = i_2, \quad (2)$$
$$I_3 + I_4 = i_3, \quad (3)$$
$$I_5 - I_4 = i_4, \quad (4)$$
$$\ldots\ldots$$
$$I_{n+1} - I_n = i_n. \quad (n)$$

On arrive à une équation supplémentaire en écrivant que la chute de tension est la même de part et d'autre du branchement $i_3$, c'est à dire qu'on a

$$I_1 r_1 + I_2 r_2 + I_3 r_3 = I_4 r_4 + \ldots + I_{n+1} r_{n+1}. \quad (n+1)$$

Ces $n+1$ équations permettent de déterminer les valeurs de I. On se contente de chercher $I_3$ et $I_4$. Si l'on trouve pour ces intensités des valeurs positives, c'est que le point considéré correspond bien au partage des courants. Exceptionnellement, la valeur obtenue pour l'une des intensités est nulle, ce qui signifie que l'un des tronçons du distributeur est passif.

Si l'on trouve une valeur négative pour un des courants, c'est l'indice que le point de partage est du côté du tronçon parcouru par ce courant. Si, par exemple, c'est $I_4$ qui a été trouvé négatif, on vérifiera si la dérivation $i_4$ est plus grande que $I_4$. Dans l'affirmative, c'est au branchement $i_4$ que s'opère le partage. Dans la négative, on cherchera plus loin, en déterminant les intensités

$I_5$, $I_6$, . . . par les équations (4), (5), . . . , jusqu'à ce qu'on trouve le lieu de partage réel.

Ce point acquis, on déterminera la tension maxima en faisant la somme des pertes de charge à partir du lieu de partage jusqu'à l'une des extrémités du distributeur. Lorsque le calcul indique une perte de charge supérieure à la variation de tension tolérée, il faut rapprocher les points de jonction des feeders.

Lorsqu'entre les boites de jonction se trouvent des distributeurs multiples, les lois de Kirchhoff permettent de trouver les intensités de courant dans les diverses branches et, partant, les points de partage où se produisent les chutes de tension maxima.

Afin de contrôler les calculs d'un avant-projet, on peut se servir de la méthode empirique suivante qui a été très utile dans l'établissement des réseaux de Milan et de Berlin. Sur un plan de la ville, peint sur bois à une grande échelle, on figure les feeders, les distributeurs et les branchements par des fils de maillechort fixés au bois par des cavaliers et dont la résistance est un sous-multiple de la résistance calculée des éléments correspondants du réseau. Les pôles d'une pile sont appliqués à l'origine des feeders et l'on vérifie, à l'aide d'un galvanomètre différentiel sensible, la différence des tensions aux boîtes de jonction et aux extrémités des fils qui représentent les bornes des récepteurs. Si les variations de tension dépassent les limites prescrites, on déplace les raccords des feeders et l'on cherche par tâtonnements les positions des jonctions permettant d'atteindre l'uniformité de tension désirée.

492. — **Variations de la production de l'énergie électrique.** — Examinons à présent les modes de réglage à employer pour produire, à l'origine des feeders, les variations de différence de potentiel nécessaires pour maintenir la tension constante dans le réseau.

Si tous les feeders sont alimentés par une seule machine génératrice et donnent lieu à des chutes de tension uniformes, il suffit de pourvoir les inducteurs de la dynamo d'une excitation composée, calculée de manière à atteindre le résultat cherché lorsque l'induit tourne à vitesse constante. C'est là un cas particulier du calcul des machines compound. Un cas simple, qui rentre dans cette catégorie, est celui d'une habitation pourvue de conducteurs servant à l'éclairage électrique et raccordée par deux fils plus ou moins longs avec une machine électrique.

Dans les distributions d'énergie électrique d'une certaine importance, la demande de courant est généralement très variable aux diverses heures de la journée.

Le diagramme ci-après indique les variations, pendant une journée, de la fourniture de l'énergie électrique destinée à l'éclairage privé, au cours des mois de décembre et de juin, la production maxima de l'usine étant de 120 kilowatts. Pendant le mois de juin, la demande maxima, qui a lieu entre 9 et 10 heures du soir, atteint environ 65 kilowatts, mais la charge moyenne de la journée n'est que de 9,84 kilowatts.

Au mois de décembre, il y a deux maxima, l'un entre 7 et 8 heures du matin, l'autre entre 6 et 7 heures du soir. La moyenne de la production journalière monte alors à 31,8 kilowatts.

La faible durée de la demande maxima explique pourquoi l'on peut, à ce moment, admettre dans les feeders des chutes de tension considérables, 20 pour 100 et plus, la chute de tension moyenne satisfaisant à la règle économique de Thomson. Dans plusieurs réseaux existants, les pertes de tension maxima sont de 15 pour 100 dans les feeders, 2 pour 100 dans les distributeurs et 1 pour 100 dans les branchements et raccordements privés.

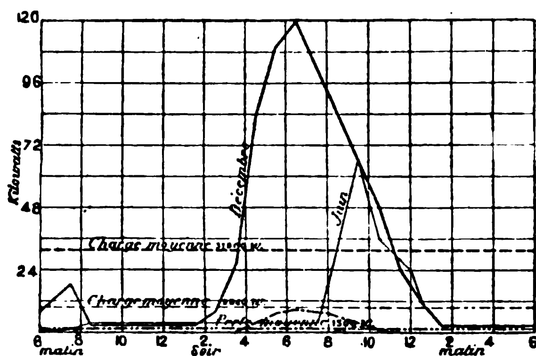



Fig. 284.

Si une usine électrique alimentait, la nuit, des lampes destinées à l'éclairage public et, le jour, des électromoteurs placés chez des particuliers ou sur des voitures de tramways, la production moyenne serait notablement accrue, mais, jusqu'à présent, la moyenne annuelle qu'on obtient dans les villes ordinaires ne

dépasse guère 10 à 20 pour 100 de la charge maxima. Le nombre annuel d'heures d'allumage des lampes varie entre 500 et 1 000, suivant l'importance des villes.

Si la production du courant était concentrée dans une seule dynamo mue par une grande machine à vapeur, ces appareils fonctionneraient dans de mauvaises conditions de rendement lorsque la puissance développée est faible, c'est à dire pendant la plus grande partie de l'année. En outre, il serait nécessaire d'installer un second groupe de machines de mêmes dimensions, comme réserve en cas d'accidents.

On préfère avec raison employer plusieurs dynamos de puissances plus faibles, mues par des moteurs indépendants, et ne mettre en marche que le nombre de machines strictement nécessaire pour satisfaire à la demande, de telle sorte que chacune d'elles fournisse un bon rendement. La détente des machines à vapeur peut d'ailleurs être réglée de manière à obtenir le rendement maximum avec une charge moyenne inférieure à la charge totale; cela est facile avec les machines compound.

Lorsque les dynamos doivent ainsi être couplées en quantité pour satisfaire à une demande de courant croissante, l'excitation compound donne lieu à des complications et l'on préfère recourir à l'excitation en dérivation. Dans ce cas, on intercale à la suite de l'enroulement de chacun des inducteurs des résistances variables permettant de régler la différence de potentiel aux bornes.

Avant d'introduire une dynamo nouvelle en dérivation avec celles qui alimentent le réseau, il faut commencer par l'exciter séparément de manière à lui faire donner la même différence de potentiel aux bornes que les dynamos en charge. Si chaque dynamo est activée par un moteur distinct, on pousse souvent la précaution jusqu'à faire produire à la dynamo son courant normal en lui donnant une résistance extérieure composée de lampes ou de bandes de nickeline. Ainsi le moteur se met dans les conditions d'admission voulues. Lorsque ces résultats sont obtenus, on peut, par une manœuvre de commutateurs, raccorder la dynamo au réseau.

Pour empêcher qu'on ne relie une dynamo au réseau avant que le circuit d'excitation ait été réglé, M. Picou a imaginé d'embrayer le commutateur de l'induit de la machine à l'aide du commutateur

de l'inducteur, de sorte que le premier ne se déplace qu'après que le second a été manœuvré.

Un agent a constamment les yeux sur le voltmètre relié aux fils pilotes et règle les résistances additionnelles des inducteurs lorsque la tension vient à varier dans le réseau. Afin de simplifier la manœuvre, on embraie, sur un axe commun mû par une manivelle unique, les leviers des rhéostats de réglage des diverses dynamos associées.

Afin d'attirer davantage l'attention de l'agent chargé de la manœuvre, l'aiguille du voltmètre fait parfois fonction de relais et met en activité des appareils avertisseurs lorsque la tension du réseau dépasse les limites assignées. La fig. 285 montre l'appareil de M. Fein destiné à réaliser ce résultat. L'aiguille du voltmètre V porte deux ressorts à contacts de platine susceptibles de toucher deux buttoirs 1, 2, et de fermer, par ce fait, le circuit d'une pile et de la sonnerie L, en même temps que celui d'une des lampes à incandescence G', G'', dont les ampoules sont de colorations différentes. Ainsi, l'agent, averti par le bruit de la sonnerie, juge par celle des deux lampes allumée du sens dans lequel il doit agir sur les rhéostats de réglage.

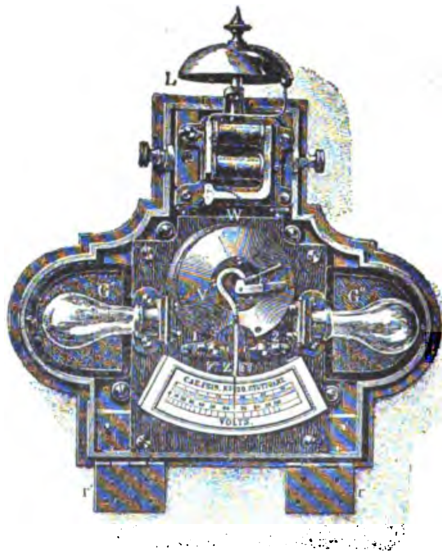



Fig. 285.

On a été plus loin dans cette voie et l'on a confié au voltmètre le soin d'effectuer automatiquement la manœuvre des rhéostats. Dans ce but, il suffit d'employer un artifice analogue à celui de la fig. 281, le relais R, enroulé comme un voltmètre, étant relié aux fils pilotes de manière à envoyer dans les solénoïdes $S^1$, $S^2$ des courants qui introduisent ou suppriment des résistances W dans le circuit des inducteurs.

Pour obtenir une action plus énergique, M. Siemens remplace parfois les solénoïdes par un petit moteur électrique agissant sur la manivelle K. Le déplacement de l'armature U entre les buttoirs $s^1$, $s^2$ a alors pour effet de faire varier le sens du courant envoyé dans l'induit du moteur et, par suite, le sens de la rotation de cet induit.

## SYSTÈMES INDIRECTS DE DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

493. — Nous avons admis dans ce qui précède que le courant électrique développé à l'usine est envoyé directement dans les récepteurs. Lorsque ceux-ci sont placés à l'intérieur des habitations, des raisons de sécurité limitent la tension du courant à 200 volts environ. Cette limitation a pour résultats de restreindre le rayon de la région susceptible d'être alimentée par une usine et d'engager à placer celle-ci au centre de gravité fictif des récepteurs, § 489.

Lorsqu'on doit desservir une agglomération très étendue, il devient nécessaire de multiplier les stations productrices. Or, l'établissement des usines électriques au milieu des grandes villes n'est pas sans soulever des objections. Il est souvent difficile de trouver dans les quartiers commerçants et les quartiers de luxe des emplacements convenables et l'on est obligé, pour éviter des réclamations, de brûler des combustibles anthraciteux de prix élevés afin de produire peu de fumées. L'arrivage du combustible ne peut souvent se faire que par charrettes, ce qui en augmente encore le prix. Enfin, au centre des villes, il est parfois impossible de se procurer de l'eau de condensation pour les machines, ce qui empêche d'employer les moteurs les plus économiques.

Toutes ces raisons engagent à éloigner les usines électriques des quartiers centraux des villes pour les transporter dans les quartiers industriels, à proximité des voies de transport qui facilitent l'accès du combustible. Le voisinage d'une voie navigable fournit à la fois un accès économique pour le combustible et l'eau d'alimentation et de condensation nécessaire pour les chaudières et les moteurs.

L'intermédiaire des transformateurs et des accumulateurs permet de résoudre le problème dans ce sens par l'utilisation des hautes tensions.

Afin de montrer la réduction du poids de cuivre résultant de l'emploi d'une tension élevée $e_1$, appelons $e_1 i_1$ la puissance distribuée par des conducteurs de section $s_1$ et de résistance $r_1$. Sous une faible tension la même puissance $e_2 i_2 = e_1 i_1$ entraînerait des câbles de section $s_2$ et de résistance $r_2$. A perte d'énergie égale, on aura $r_1 i_1^2 = r_2 i_2^2$, ou

$$\frac{i_1^2}{s_1} = \frac{i_2^2}{s_2} \text{ d'où } \frac{s_1}{s_2} = \frac{i_1^2}{i_2^2} = \frac{e_2^2}{e_1^2}.$$

La section des conducteurs est donc inversement proportionnelle au carré de la tension adoptée.

A perte égale et avec une même section, la longueur des artères est proportionnelle au carré de la tension.

**494. — Emploi des transformateurs à courants alternatifs. —** L'emploi des machines et des transformateurs à courants alternatifs fournit une solution extrêmement séduisante. A l'aide des premières, l'énergie électrique est développée sous des tensions élevées qui permettent de la transporter à des distances de plusieurs kilomètres par des câbles de faibles sections. Les transformateurs, installés à proximité des points où l'énergie est utilisée, ramènent la tension du courant dans les limites tolérées. Cette combinaison permet d'employer des conducteurs de petites sections susceptibles, dans certaines circonstances, d'être placés sur des poteaux ou sur les toits des maisons. Il en résulte alors une notable économie d'installation sur le système de distribution directe. En outre, les circuits qui alimentent les récepteurs sont complètement isolés du circuit des générateurs. Ainsi, les défauts d'isolement qui surviennent fréquemment dans les installations faites à l'intérieur

des habitations sont sans influence sur le fonctionnement général de la distribution, tandis que, dans les systèmes de distribution directs, les contacts à la terre des installations privées étendent leurs effets jusqu'à l'usine centrale. Dans le cas particulier où le défaut d'isolement produit un court-circuit dans une installation privée, le courant aura atteint momentanément une valeur très élevée dans une distribution directe, avant que le fil de sûreté qui protège le branchement ne soit fondu. L'accroissement d'intensité sera beaucoup moindre dans une distribution par transformateurs, car le courant secondaire est limité par la puissance de l'appareil de transformation.

Les transformateurs peuvent être installés chez les abonnés à la condition de mettre le circuit primaire, traversé par le courant de haute tension, hors de l'atteinte du public. Ce système permet de desservir des abonnés éparpillés dans une agglomération étendue, ainsi que le cas se présente fréquemment dans les villes de moyenne ou de faible importance. Parfois un transformateur sert pour un groupe d'habitations voisines qui se raccordent au circuit secondaire par un système de conducteurs de distribution.

On a vu, § 465, que, dans les transformateurs d'une certaine puissance, la perte d'énergie ne dépasse pas 4 à 7 pour cent lorsque la charge de l'appareil est supérieure à la moitié de sa puissance nominale. L'énergie dépensée dans le primaire est donc peu différente de celle recueillie dans le secondaire. D'autre part, le rapport des tensions primaires et secondaires est sensiblement constant et égal au rapport des nombres de spires des deux circuits. Il résulte de là que, si l'énergie est fournie sous forme de courant constant au circuit inducteur, le courant sera pratiquement constant dans le circuit induit. Si c'est la différence de potentiel qui est constante aux bornes du primaire, on obtiendra sensiblement une tension constante aux bornes du secondaire, tout au moins dans de larges limites de fonctionnement. Les formules indiquées au § 461 mettent nettement ces faits en évidence.

On déduit de ce qui précède deux modes distincts de distribution par transformateurs.

495. — **Transformateurs en série.** — Tous les transformateurs servant à une distribution d'électricité peuvent avoir leurs bobines

directions, il pourra y avoir des inégalités dans les pertes de charge ; mais généralement les différences sont peu importantes, lorsque le groupement des récepteurs a été bien étudié. Si les écarts sont trop grands, on peut laisser dans les artères des rhéostats qu'on règle de temps en temps dans le but d'égaliser les chutes de potentiel.

Un troisième procédé permet de maintenir la tension constante à la fois à l'usine et dans le réseau. Il consiste à multiplier les feeders d'égale résistance. Aux heures où la charge est faible, on supprime la plus grande partie de ces artères qu'on utilise ensuite au fur et à mesure des besoins de la consommation, de manière à maintenir constante la chute de tension dans les feeders. La Compagnie Edison emploie 30 à 40 artères par usine centrale ; chaque croisement de rues présente une boîte de jonction.

Ce système donne un rendement inférieur au précédent, attendu qu'il occasionne une chute de tension uniforme pendant la journée entière, alors que, si l'on maintient tous les feeders en charge, la tension à l'usine n'atteint la valeur maxima qu'aux heures de fort débit.

Lorsque le rayon de l'agglomération à desservir est étendu, on multiplie les usines électriques en les disposant, autant que possible, au milieu des quartiers à alimenter. Souvent on raccorde entr'eux les réseaux de distribution de ces divers quartiers, ce qui permet à une seule usine d'alimenter l'agglomération entière aux heures de la journée ou de la nuit où la demande d'énergie électrique est faible. A ces moments, la chute de potentiel dans l'ensemble des réseaux est minime et la tension présente une uniformité suffisante dans la canalisation.

On a vu que la tension aux points où les feeders se raccordent avec les distributeurs est indiquée à l'usine centrale par le moyen des fils pilotes qui reviennent des boîtes de jonction vers des voltmètres placés à proximité des générateurs. Lorsque plusieurs feeders ont une origine commune, leurs fils pilotes se réunissent au même voltmètre, qui indique ainsi la tension moyenne des jonctions correspondantes, si l'on a soin d'égaliser, par des résistances additionnelles, les résistances des divers fils pilotes, et si l'on emploie un voltmètre d'une résistance très grande relativement à celle de ces fils. Ces résistances additionnelles, qui n'ont que quelques ohms,

sont nécessaires pour empêcher les fils d'être brûlés en cas d'écart anormal entre les tensions aux boîtes de jonction.

Les fils pilotes peuvent être reliés, avec avantage, aux distributeurs entre les boîtes de jonction, aux points où la chute de tension est maxima.

On peut éviter l'emploi des fils pilotes, dont la pose entraîne certaines complications, en estimant la chute de tension dans les feeders d'après l'intensité du courant qui les traverse. L'ampèremètre placé à l'origine d'un feeder de résistance $r$ peut être gradué de manière à indiquer directement la chute de potentiel $ir$. On déduit de cette dernière la tension à réaliser aux bornes des générateurs. Ce procédé exige deux lectures, l'une à l'ampèremètre, l'autre au voltmètre relié aux dynamos.

On supprime l'une des lectures par l'emploi d'une méthode différentielle : un voltmètre est pourvu de deux enroulements également éloignés de l'aimant mobile et agissant en sens inverses sur celui-ci. Un premier circuit formé de fil fin est relié directement aux bornes des générateurs. Le second circuit comprend une simple spire de fil traversée par le courant total qui s'écoule par le feeder. Lorsque ce courant est nul, la déviation de l'aimant indique la tension aux générateurs, identique alors à celle des points de raccord du feeder avec le réseau. Si le courant croît, la déviation de l'aiguille tend à diminuer. Pour la maintenir constante, il faut augmenter la tension aux générateurs, de manière que l'accroissement d'action du fil fin compense l'action de l'enroulement à gros fil. Le réglage consiste donc à modifier la tension des générateurs jusqu'à ce que l'aiguille revienne à la position initiale.

491. — **Positions des raccords des feeders avec le réseau.** — La désignation des points de raccord des feeders avec le réseau donne lieu à des calculs, souvent très laborieux, basés sur les lois de Kirchhoff. On suppose, pour simplifier le problème, que les conducteurs de retour sont remplacés par la terre et que la résistance de cette dernière est nulle. Pour obtenir la perte de tension réelle, on doit alors admettre que la résistance des divers conducteurs du réseau est doublée.

Le problème est ainsi amené dans la plupart des cas à l'énoncé suivant. On donne un distributeur dont les extrémités sont main-

automatiquement l'excitation de la dynamo. Dans ce but, une dérivation du courant secondaire, convenablement réglée par un rhéostat, traverse un solénoïde dont le noyau, équilibré par un ressort, supporte une coupe de mercure. Dans celle-ci plongent des fils de longueurs différentes permettant au mercure de mettre en court-circuit un nombre plus ou moins grand de résistances intercalées dans le circuit d'excitation. Lorsque la tension utile varie, le noyau se déplace et modifie les résistances de manière à amener le courant d'excitation à l'intensité voulue pour rétablir la tension normale dans le réseau.

498. — **Régulateur Kapp.** — M. Kapp a préconisé une autre combinaison pour assurer une tension constante aux transformateurs d'un réseau.

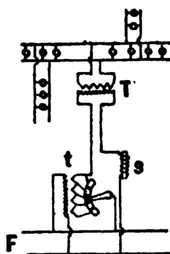


Fig. 287.

La différence de potentiel est maintenue invariable aux bornes des alternateurs. Pour corriger les effets de la chute de tension dans les distributeurs F, lors de l'accroissement de la charge secondaire d'un transformateur quelconque T, on ajoute à ce dernier un transformateur régulateur *t* dont le primaire est relié aux conducteurs F, tandis que le secondaire est formé de spires qui peuvent être intercalées en nombre variable en série avec le primaire de T, dans le but de renforcer la puissance de celui-ci. Un solénoïde S, traversé par le courant primaire de T, commande, par l'intermédiaire d'organes non figurés dans le dessin, le levier d'un manipulateur, lequel introduit automatiquement les spires destinées à accroître la tension primaire de T.

499. — **Mesures de précaution.** — Les précautions ordinaires doivent être prises pour éviter l'échauffement des conducteurs

lors d'un court-circuit. Les feeders, les circuits primaires et les circuits secondaires des transformateurs seront protégés par des coupe-circuits fusibles. Les coupe-circuits destinés à fonctionner sur les circuits soumis à de hautes tensions doivent être construits avec des soins spéciaux, car la fusion des fils de sûreté peut amener la production d'arcs voltaïques de grande longueur au sein desquels le courant persiste. M. de Ferranti emploie des fils fusibles très longs, passant dans des blocs de faïence qui éteignent l'arc voltaïque de rupture.

Pour empêcher qu'un contact accidentel entre la bobine primaire et la bobine secondaire d'un transformateur ne mette à la portée du public des tensions dangereuses, on se contente généralement de séparer la première de la seconde ainsi que du noyau par un diélectrique de 8 à 10 mm d'épaisseur. Quelques dispositifs supplémentaires ont été conseillés.

Voici une combinaison ingénieuse, due à M. Cardew, et destinée à éviter tout danger dans le circuit secondaire. Celui-ci est mis en communication avec un disque métallique très peu écarté d'un autre disque relié à la terre. Ce dernier porte, dans l'intervalle des deux disques, une lame mince et flexible en aluminium maintenue par une de ses extrémités. Lorsque la différence des potentiels des disques dépasse 400 à 500 volts, l'extrémité libre de la lame est soulevée par l'attraction électrostatique et son contact amène un accroissement du courant primaire, ce qui détermine la fusion des fils de sûreté qui protègent le transformateur.

M. Elihu Thomson emploie dans le même but un autre dispositif: les extrémités du secondaire sont reliées à deux blocs métalliques sur lesquels appuient, par l'intermédiaire de feuilles minces de papier, des lames élastiques en communication avec la terre. Ces feuilles résistent à la tension secondaire normale; mais si la tension augmente par suite d'un contact avec le circuit primaire, les feuilles de papier sont aussitôt percées de trous; le secondaire est ainsi mis en court-circuit et le primaire devient le siége d'un courant qui provoque la fusion des fils de sûreté.

Souvent on se borne à mettre un point du circuit secondaire en communication directe avec le sol, ce qui empêche la production d'une tension élevée en cas de contact avec le primaire.

M. Kent a aussi proposé de séparer les deux enroulements du

transformateur par une feuille métallique qu'on divise pour éviter les courants de Foucault et qu'on met en communication avec la terre. Si le circuit primaire présente un défaut d'isolement, le point défectueux prend alors un potentiel nul.

**500. — Divers procédés d'utilisation des transformateurs en dérivation. Transformateurs isolés.** — Il existe diverses manières de desservir les abonnés d'une distribution par transformateurs en dérivation.

On peut disposer un transformateur pour chaque abonné, soit dans la cave, lorsque la canalisation est souterraine, soit contre un des murs extérieurs de l'habitation ou sur un poteau voisin de la maison, lorsque la canalisation est aérienne. La fig. 288 montre une disposition de ce genre adoptée par M. Westinghouse.



Fig. 288.

Ce système permet de desservir des abonnés disséminés et très distants les uns des autres, mais, à moins d'interrompre le circuit primaire quand le secondaire est inactif ou de ne mettre les machines génératrices en marche qu'à certaines heures de la soirée et de la nuit, il ne donne, comme on l'a vu au § 468, qu'un rendement moyen de 70 à 80 pour 100 (rapport des watts-heure utiles aux watts-heure absorbés.)

Cet abaissement du rendement d'appareils qui restituent en pleine charge 95 pour 100 de l'énergie fournie tient à ce que les pertes par hystérésis et par courants de Foucault restent sensiblement constantes dans le noyau, quel que soit le débit. Pour améliorer le rendement moyen, on diminue ces pertes en restreignant les dimensions du noyau, ce qui oblige à augmenter la dépense de cuivre pour obtenir le même effet utile. La diminution du flux magnétique entraîne, en effet, à accroître le nombre des spires inductrices et induites. Il s'ensuit une augmentation de la perte par effet Joule en pleine charge, mais le rendement moyen est meilleur. La quantité plus grande de cuivre augmente la chute de tension dans le circuit secondaire et oblige à recourir au système des feeders, qui permet de relever progressivement la tension primaire à mesure que le débit augmente.

M. Swinburne est allé plus loin dans cette voie, § 459. Il a adopté les transformateurs à circuit magnétique ouvert, ce qui réduit au minimum l'hystérésis du noyau. Mais un autre inconvénient se produit dans ce cas. Lorsqu'un transformateur a son circuit secondaire ouvert, l'énergie dépensée dans le circuit primaire est minime, par suite du retard de phase que la self-induction détermine entre la différence de potentiel et le courant primaires. L'expression de la puissance fournie est, en effet, $\frac{E_1 I_1}{2} \cos \varphi$. Dans un transformateur à circuit magnétique ouvert, où le nombre de spires primaires est très grand, $\varphi$ est voisin de 90° dans la marche à vide. Il en résulte que, pour produire l'énergie nécessaire à l'aimantation du noyau, $I_1$ atteint à vide une valeur élevée. Il en résulte que les pertes par effet Joule dans les primaires des transformateurs, le réseau et les alternateurs varient peu et que toutes les machines de la station centrale doivent être maintenues en marche pendant la journée entière, avec un rendement défavorable aux heures de faible charge. Cela explique des chiffres cités par M. Preece pour une distribution fonctionnant cependant avec des transformateurs à circuit magnétique fermé. La dépense de combustible à l'usine atteignait 7,2 kg par kilowatt-heure utile, 4,8 kg par kilowatt-heure produit, soit un effet utile de 67 pour 100. M. Swinburne a proposé de combattre la self-induction des circuits primaires par des condensateurs jouant le rôle de self-

inductions négatives, mais le prix de ces auxiliaires paraît jusqu'à présent trop élevé.

**501. — Transformateurs groupés en sous-stations.** — On obtient un effet utile supérieur en formant des centres de distribution secondaires, comprenant un groupe de transformateurs de grandes dimensions, dont le rendement est meilleur que celui des petits transformateurs. Ces centres de distribution sont reliés par un réseau secondaire aux abonnés habitant aux alentours. On met les transformateurs successivement en activité au fur et à mesure que la demande s'accroît, et on retire au contraire les appareils des réseaux primaire et secondaire quand la demande diminue. De cette manière chaque transformateur fonctionne dans les meilleures conditions et le rendement moyen varie entre 90 et 96 pour 100, suivant les appareils employés.

Les manœuvres précédentes peuvent se faire automatiquement.

Ces centres secondaires s'installent chez quelques uns des abonnés, dans des caves creusées sous les trottoirs ou dans des kiosques spéciaux. Il convient de ventiler les locaux choisis afin d'éviter l'accumulation de la chaleur dégagée par les transformateurs.

Rien n'empêche d'employer un conducteur intermédiaire dans le réseau secondaire de façon à utiliser le système à trois conducteurs pour l'alimentation des récepteurs.

Dans divers réseaux existants, on craint de relier entr'eux les groupes de distributeurs alimentés par des feeders distincts, parce que les canalisations soumises à des tensions élevées sont très exposées à des accidents et qu'il suffit alors de deux contacts avec la terre pour amener un court-circuit général. C'est pourquoi on constitue souvent des réseaux partiels, sans communication entr'eux, qu'on alimente par des feeders recevant le courant d'alternateurs spéciaux. Si ces réseaux partiels sont peu importants, un seul alternateur est affecté à chacun d'eux, en sorte que, si l'une des machines vient à manquer, les distributeurs correspondants sont mis hors de service.

Pour obvier à cet inconvénient, M. Swinburne a proposé de faire usage d'une sorte de transformateur auxiliaire D, fig. 289, portant autant de bobines qu'il y a d'alternateurs, chaque alternateur communiquant avec une bobine. Les dynamos sont ainsi

couplées en quantité, sans qu'il y ait de liaison directe entre leurs circuits. Les courants traversant les bobines du transformateur ont seulement l'intensité nécessaire pour maintenir les machines en concordance. Si l'une de celles-ci, A par exemple,

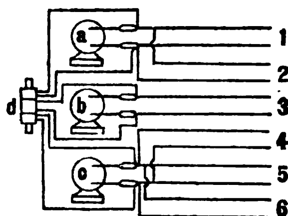



Fig. 289.

vient à faillir, on l'isole, et la bobine correspondante fournit l'énergie électrique aux feeders 1 et 2 jusqu'à ce qu'on ait pu relier ces derniers à l'un des autres alternateurs ou à une machine de réserve.

On peut aussi relier entr'eux les réseaux secondaires des sous-stations par l'intermédiaire de transformateurs dont le coefficient de réduction est l'unité, ce qui évite les contacts directs et diminue les conséquences d'une perte à la terre.

Les transformateurs se prêtent à une foule de combinaisons de ce genre. Au lieu de transformer l'énergie électrique aux points d'utilisation seulement, on peut aussi la transformer à l'usine productrice de manière à permettre l'emploi d'alternateurs à basse tension et à limiter l'électricité de haute tension au réseau qui relie les deux groupes de transformateurs. Cette combinaison amène encore une perte d'énergie, assez faible si l'on s'arrange de manière à faire travailler les transformateurs de l'usine sous des charges convenables. Par contre, le système a l'avantage de réduire les difficultés de construction des machines et de permettre de diminuer dans celles-ci les espaces perdus par les isolants, ce qui améliore le rendement. Enfin, on évite tout danger dans la manipulation des alternateurs.

Une combinaison semblable étant admise, on pourra, comme l'indique M. Swinburne, grouper les alternateurs en quantité sur les circuits primaires des transformateurs destinés à alimenter des

feeders distincts, fig. 290. Pour modifier la tension dans le réseau, il suffit de faire varier le nombre des spires primaires intercalées dans le circuit de chaque transformateur.

M. de Ferranti fait usage, à Londres, d'une double transformation conçue dans un but différent. Les dynamos génératrices à très haute tension sont installées à environ 7 kilomètres du réseau à alimenter. Elles sont reliées à une station de transformateurs établie au centre de ce réseau. De là des conducteurs secondaires se rendent aux transformateurs d'abonnés, où une nouvelle réduction amène l'électricité à la tension voulue pour l'utilisation.

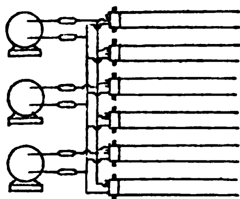


Fig. 290.

**502. — Emploi des transformateurs rotatifs.** — On a objecté aux courants alternatifs qu'ils ne permettent pas, jusqu'à présent, l'emploi des accumulateurs qui, dans certaines installations comme celles destinées à l'éclairage des théâtres, fournissent une réserve utile lors d'un accident dans la canalisation.

Un autre reproche est que les moteurs synchroniques à courants alternatifs sont inférieurs aux moteurs à courant continu au point de vue de la facilité du démarrage et de la conduite. Enfin les courants alternatifs ne se prêtent pas aux opérations électrochimiques. Ces raisons ont fait rechercher un système de distribution par transformateurs à courants continus. Le suivant peut être employé.

L'usine électrique comporte un certain nombre de dynamos continues à haute tension susceptibles d'être réunies en dérivation pour alimenter, à l'aide d'un réseau primaire pourvu au besoin de feeders, une série de centres de distribution reliés aux récepteurs par des réseaux secondaires.

Dans ces postes subsidiaires se trouvent un ou plusieurs moteurs-

générateurs pouvant également être associés en dérivation pour faire face à la demande de courant. Chacun de ces appareils comprend un moteur électrique relié au réseau primaire et mettant en mouvement une dynamo continue à basse tension envoyant son courant dans le réseau des récepteurs.

Généralement les deux machines, motrice et génératrice, sont fixées sur le même arbre, parfois même elles sont réunies en une seule. Dans ce cas, un inducteur unique, excité par le réseau primaire, entoure un induit dont les sections sont composées alternativement de fil fin et de gros fil. L'enroulement en fil fin est relié à un collecteur situé d'un côté de l'induit et alimenté par le courant primaire. L'enroulement de gros fil, connecté à un second collecteur situé de l'autre côté de l'induit, engendre le courant de faible tension. Si cette dernière combinaison permet de simplifier les appareils, elle offre l'inconvénient de rapprocher les deux circuits et d'exposer ceux-ci à venir en contact, ce qui introduit dans le réseau secondaire une tension dangereuse. On remarquera que la réaction d'induit d'une telle machine est très faible par suite des effets antagonistes des deux enroulements.

Le système que nous venons d'esquisser est inférieur au système par transformateurs alternatifs au double point de vue du rendement et de l'entretien. Les transformateurs à courants continus ne dépassent guère un rendement de 80 pour 100, même avec la charge maxima, alors que, dans des conditions semblables, les bons transformateurs alternatifs procurent un rendement supérieur à 96 pour 100. En outre, les moteurs-générateurs sont des appareils à rotation qui exigent des soins constants, tant sous le rapport du graissage et de l'entretien des balais que sous celui de la régularisation de la vitesse et de la tension; au contraire, les transformateurs alternatifs peuvent être abandonnés sans surveillance aucune dans un local restreint.

Les transformateurs à courants continus sont appliqués par la Société pour la transmission de la force qui alimente, à l'aide d'une station génératrice située à Saint-Ouen, quatre stations réceptrices placées respectivement à Asnières, à Saint-Denis et à Paris. Les lignes primaires sont aériennes sur la plus grande partie de leur parcours. Les lignes aboutissant aux deux usines de Paris suivent le

chemin de fer du Nord et comportent une section aérienne de 7,5 kilomètres.

Les machines génératrices, de la puissance de 100 chevaux, sont excitéés par des dynamos indépendantes à basse tension. Leurs induits développent 3 000 volts. Les génératrices sont associées en quantité au fur et à mesure que la demande s'accroît.

Pour diminuer les étincelles de rupture lors de la suppression d'une génératrice, on fait passer son courant par un rhéostat à eau dont les électrodes en fer sont écartées progressivement jusqu'à réduire ce courant à une valeur minime.

503. — **Distribution par courants polyphasés.** — Les machines à courants polyphasés ont fourni de nouvelles solutions de la transformation des courants de haute tension en courants utilisables de faible tension. On verra plus loin la description de l'appareil Schuckert, qui permet de transformer un courant diphasé en courant continu. L'énergie électrique peut être transportée sous forme de courants diphasés de haute tension convertis, par des transformateurs, dans des sous-stations, en courants de basse tension : ces derniers sont ramenés à l'état de courant continu par la machine Schuckert.

On utilise également les courants triphasés, par le moyen d'une distribution à trois conducteurs. Les récepteurs sont alors branchés en étoile sur les trois câbles. Il faut que les trois dérivations prises sur les conducteurs absorbent le même courant, sinon l'équilibre ne subsiste pas. On peut remédier à un défaut d'équilibre en réunissant le point de concours des dérivations au nœud correspondant du générateur par un quatrième fil, appelé fil compensateur. Dans certains cas, ce dernier peut être remplacé par la terre.

504. — **Emploi des accumulateurs dans les distributions.** — Les accumulateurs conduisent à d'autres solutions de la distribution indirecte à courant continu. Ces appareils ont l'avantage sur les transformateurs de constituer des réservoirs d'énergie, au même titre que les gazomètres dans les usines à gaz. Ils permettent de tirer un meilleur parti de la puissance productrice de l'usine électrique et de diminuer l'importance des machines, attendu que

celles-ci peuvent accumuler par un travail constant et continu l'énergie consommée à certaines heures de la journée. Si l'on se reporte au diagramme de la fig. 284, on voit que, dans le cas auquel se rapporte ce diagramme, les machines doivent fournir, à un moment donné, une puissance électrique de 120 kilowatts pendant le mois de décembre, alors que la charge moyenne de la journée ne dépasse pas 31,8 kilowatts. Si donc on emploie des accumulateurs ayant 75 pour 100 de rendement, il est possible de réduire au tiers la puissance productrice de l'usine, à la condition de faire fonctionner les machines pendant 24 heures.

D'un autre côté, les accumulateurs constituent une réserve utile et permettent de réduire les variations de tension dans le réseau de distribution, lorsque les machines présentent des irrégularités de vitesse ou des arrêts momentanés.

Ce qui empêche l'emploi des accumulateurs de se généraliser, c'est le prix élevé de ces appareils, ainsi que les soins que demande leur conduite. Cependant les perfectionnements progressifs qu'on apporte à leur fabrication font espérer que les obstacles que rencontre leur développement iront en s'atténuant de jour en jour. Actuellement des firmes importantes assument complètement l'entretien des accumulateurs, pendant une période de dix ans, au taux de 4 à 5 pour 100 du prix d'achat. Dans un grand nombre de stations électriques, une batterie d'accumulateurs est employée pour assurer l'éclairage à partir de l'arrêt des machines, à minuit ou à une heure du matin, jusqu'à leur mise en marche au crépuscule.

Le chargement de ces accumulateurs exige une tension supérieure à celle du réseau. Divers moyens sont utilisés pour effectuer ce chargement pendant que les machines alimentent les lampes. On peut, à cet effet, grouper les éléments secondaires en deux séries mises en quantité. Une combinaison préférable consiste à employer un transformateur à courants continus dont le circuit primaire est relié aux dynamos et dont le secondaire charge tous les éléments en tension.

Il convient de faire remarquer que l'absence d'accumulateurs n'empêche pas les usines électriques établies dans les villes d'assurer la fourniture du courant d'une manière absolument régulière. Grâce à l'emploi de dynamos associées en dérivation et mues par des machines indépendantes, ainsi qu'à la précaution de faire mar-

cher à vide un moteur et une dynamo de réserve, le personnel de ces usines est arrivé à éviter complètement tout arrêt, même momentané, de la distribution.

**505. — Emploi des accumulateurs dans les installations privées.** — Mais si l'on atteint ce résultat dans les grandes usines qui possèdent un personnel exercé et une réserve importante, on ne peut espérer l'obtenir dans les petites installations privées, mues par un moteur souvent irrégulier soit par un défaut de système, soit parce qu'il active en même temps des appareils à marche variable autres que la dynamo. Dans ce cas, l'emploi d'une batterie secondaire peut rendre de grands services.

Une disposition applicable dans une circonstance semblable est représentée par la fig. 291.

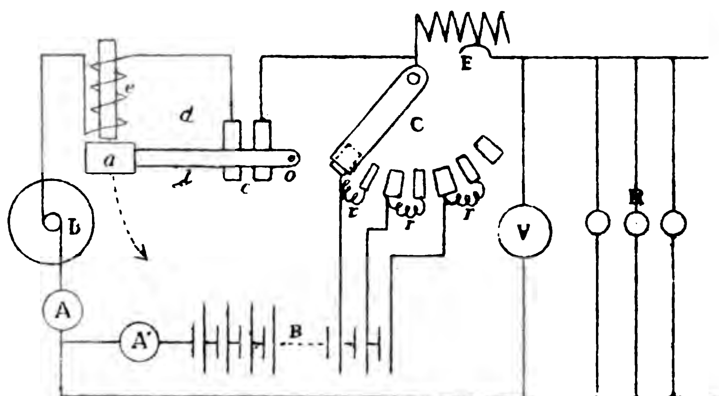



Fig. 291.

La dynamo D, excitée en dérivation, est pourvue d'un régulateur de champ magnétique formé par un rhéostat intercalé dans le circuit des inducteurs. Elle alimente les récepteurs R placés en dérivation ainsi que la batterie d'accumulateurs B.

Un disjoncteur automatique *d* a pour but de couper la communication entre la dynamo et les accumulateurs, lorsque, par suite d'un ralentissement accidentel du moteur, ceux-ci sont exposés à se décharger dans la machine électrique. A cet effet, un levier *l*, basculant autour d'un point O, réunit deux contacts *c* de manière à compléter le circuit. Le levier est terminé par une armature que

l'on applique à la main contre un électro-aimant traversé par le courant. Lorsque l'intensité de ce dernier vient à tomber en dessous d'une valeur déterminée, le poids du levier arrache l'armature et le circuit est rompu.

Généralement, dans une installation semblable, la machine charge les accumulateurs lorsque les récepteurs sont inactifs ou fonctionnent en petit nombre. La batterie vient en aide à la dynamo lorsque les récepteurs sont tous en activité.

Ces conditions exigent que la tension aux récepteurs, indiquée par le voltmètre V, soit maintenue sensiblement constante. Or, comme la différence de potentiel exigée pour la charge des accumulateurs est supérieure à la tension aux récepteurs, on doit intercaler un rhéostat E destiné à provoquer au besoin un abaissement de tension de manière à assurer la constance des indications du voltmètre. Au lieu du rhéostat E, on peut également employer quelques couples secondaires en opposition par rapport à B.

Lorsque la batterie B concourt avec la dynamo à l'alimentation des récepteurs, il convient de retirer le rhéostat E du circuit et de modifier le nombre des éléments utilisés de la batterie de manière que le voltmètre V indique la tension normale et l'ampèremètre A′ un courant de decharge approprié au type d'accumulateurs en usage. Pour opérer ce réglage, on se sert d'un commutateur à manette C, qui permet de retirer ou d'ajouter un certain nombre de couples. Pour empêcher que, pendant le passage du levier du commutateur d'un bloc au suivant, les couples ne soient mis en court-circuit, les blocs sont dédoublés et leurs deux parties convenablement reliées à l'aide de boudins de maillechort *r* qui, pendant la manœuvre, sont traversés par le courant des éléments commutés.

Il importe pour la conservation des accumulateurs que la charge de ces couples de réserve soit réglée attentivement à l'aide du densimètre. Sans cette précaution, il arrive que ces éléments sont ou trop chargés ou trop déchargés et qu'ils se détériorent rapidement.

On évite complètement cet inconvénient en supprimant le commutateur C et en maintenant le nombre des éléments constant pendant la charge et la décharge Le réglage de la tension s'opère alors à l'aide du rhéostat E et du régulateur du champ magnétique de la dynamo. Le courant qui traverse E est parfois assez considé-

rable, ce qui nécessite l'emploi de résistances formées de bandes de nickeline.

L'importance donnée aux éléments B dépend de l'effet qu'on veut en obtenir. Si l'on désire que la batterie débite une notable fraction de l'énergie utilisée, il conviendra d'utiliser des éléments de grandes dimensions, ce qui entraînera une charge prolongée.

Parfois, on n'a recours à la batterie que pour masquer les irrégularités du moteur et donner au mécanicien le temps de régler les machines lorsqu'il se produit des variations brusques dans les récepteurs. Dans ce cas, il suffit d'employer des éléments de faibles dimensions, maintenus constamment en charge et réglés de manière que, la résistance E étant supprimée, l'ampèremètre A′ indique un courant nul en marche normale. S'il se produit alors une variation dans les machines ou dans la consommation, les accumulateurs suppléent pendant quelque temps à la demande en débitant leur réserve d'énergie électrique. Avec un moteur irrégulier, tel qu'un moteur à gaz, les accumulateurs jouent le rôle d'un volant puissant pour masquer les variations de la tension de la dynamo. Toutefois, la régularisation n'est obtenue que si la batterie n'est pas surchargée; car la tension, qui peut atteindre 2,7 volts par élément pendant la charge, tombe brusquement à 2 volts environ à la décharge. Il convient donc, dans l'application en vue, de régler la tension aux accumulateurs de manière à ne pas dépasser 2,2 volts par élément.

506. — **Autre disposition.** — La disposition décrite au paragraphe précédent oblige à appliquer au circuit utile la même tension électrique qu'aux accumulateurs. Par la modification indiquée dans la fig. 292, cette sujétion disparaît et l'on peut charger la batterie entière, tout en conservant aux récepteurs R une tension réduite marquée par un voltmètre V. Cette combinaison repose sur l'emploi d'un commutateur à deux leviers L, L′ et à résistances intermédiaires non figurées. La dynamo D, dont la tension est marquée par un voltmètre V′ et le courant par un ampèremètre A′, peut être reliée au levier L′ ou aux récepteurs, à l'aide d'un commutateur I. Un disjoncteur automatique D empêche le courant de décharge des accumulateurs de traverser la dynamo. Dans le circuit des accumulateurs, on a indiqué un

ampèremètre A et un indicateur K destiné à marquer le sens du courant dans les couples secondaires. Les coupe-circuits C et C′ complètent l'installation.

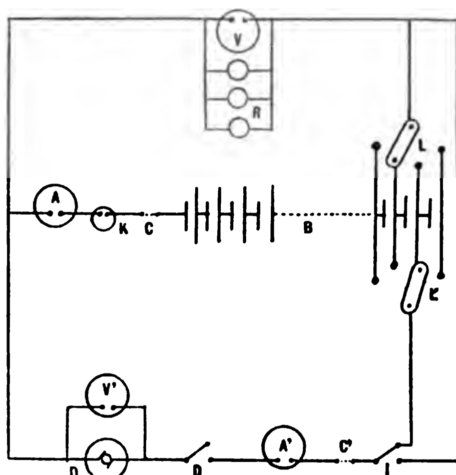



Fig. 292.

507. — **Système Monnier.** — M. Monnier a étendu le système précédent aux distributions d'électricité urbaines. La station génératrice alimente un certain nombre de stations secondaires comportant chacune une batterie d'accumulateurs, les diverses batteries étant réunies en série. Chacune des batteries contribue, avec les dynamos, à alimenter un groupe de lampes raccordées par un réseau secondaire.

Les machines fonctionnent une partie de la journée, de deux heures à minuit par exemple, sous un régime de courant constant. Lorsque la demande d'énergie est faible, les accumulateurs se chargent. Aux heures où la demande devient considérable, les couples secondaires s'unissent aux dynamos pour y satisfaire.

Chaque station possède deux commutateurs, l'un pour faire varier le nombre des éléments en charge, l'autre pour régler la tension appliquée au réseau secondaire. Ce dernier réglage peut également s'opérer par un rhéostat qui permet de faire varier la tension par fractions moindres que la force électromotrice d'un élément.

Grâce à cette combinaison, on peut, avec un poids modéré d'accumulateurs et une puissance motrice moyenne, garantir un bon rendement à la distribution. Supposons, en effet, que les dynamos distribuent directement les deux tiers de l'énergie totale consommée en 24 heures et que les accumulateurs débitent le tiers restant pendant le nombre d'heures, d'ailleurs très restreint, où la demande s'élève beaucoup au-delà du débit moyen (voir fig. 284). En admettant que les couples aient un rendement de 70 pour 100, le rendement total de la transformation est

$$\frac{2}{3} \times 1 + \frac{1}{3} \times 0{,}7 = 0{,}9,$$

soit 90 pour 100.

L'application de ce système suppose, toutefois, que chaque section alimentée par une batterie d'accumulateurs consomme la même quantité d'énergie. Or, celle-ci varie non-seulement d'une section à une autre, mais encore d'un jour à l'autre dans une même section. Comme toutes les batteries sont chargées en tension, il convient de prévoir un arrangement propre à proportionner l'emmagasinement à la demande de chaque section. Lorsqu'une batterie a atteint la charge voulue, on peut, par exemple, la mettre hors circuit et réunir directement les conducteurs qui la relient aux dynamos. Celles-ci sont alors réglées de manière à ramener leur courant à l'intensité normale.

Le système Monnier permet de développer l'énergie électrique sous une tension élevée, tout en maintenant une différence de potentiel modérée entre les conducteurs de chaque réseau secondaire. Ainsi, avec 4 groupes d'accumulateurs donnant 110 volts, on atteint à la station génératrice une tension d'environ 450 à 500 volts, qui permet de desservir une agglomération assez étendue.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que si l'un des pôles du groupe de dynamos est mis accidentellement en contact avec la terre, les conducteurs reliés à l'autre pôle sont portés au potentiel maximum de 500 volts, lequel est susceptible d'occasionner des secousses très pénibles à une personne touchant ces conducteurs et reposant sur un sol humide.

Afin de diminuer cet inconvénient, M. Monnier propose de relier à la terre un point situé vers le milieu du circuit des machines, en

sorte que les pôles de celles-ci ne puissent dépasser un potentiel égal à la moitié de la tension totale.

**508. — Système Siemens et Halske.** — Le secteur de Clichy utilise un système de distribution combiné par MM. Siemens et Halske, dans lequel les diverses batteries d'accumulateurs sont concentrées à l'usine productrice et concourent avec les dynamos à alimenter un réseau à 5 conducteurs, § 487. Chaque dynamo développe une tension supérieure à celle des batteries réunies en série, et les feeders intermédiaires sont branchés sur les fils de communication des diverses batteries. Celles-ci absorbent l'énergie des dynamos pendant une partie de la journée et leur viennent en aide lorsque la consommation dépasse le débit des machines.

Comme, dans cette combinaison, on a sous la main toutes les batteries réunies, on peut intervertir les connexions entre celles-ci et le réseau lorsqu'elles présentent des états de charge ou de décharge trop différents.

Des égalisateurs répartissent uniformément la tension entre les divers circuits dérivés, § 487.

**509. — Système King.** — Au lieu de laisser, comme dans le système précédent, les récepteurs en relation avec le circuit de charge, il est possible d'isoler complètement les réseaux secondaires du circuit primaire, en disposant dans chaque centre de distribution deux batteries qui sont chargées à tour de rôle par la station génératrice. Les batteries en charge dans les diverses stations sont reliées en série et, comme elles sont isolées des récepteurs, le circuit primaire peut être parcouru par un courant de haute tension, comme dans les distributions par transformateurs.

Pendant la plus grande partie de la journée, une des batteries de chaque groupe suffit pour alimenter les récepteurs correspondants. Aux heures où la demande dépasse notablement le débit moyen, on met les deux batteries en quantité.

Pour substituer l'une des batteries à l'autre dans le circuit de charge, on commence par mettre en parallèle avec la batterie en charge une résistance égale à la résistance apparente de cette batterie. On retire alors celle-ci pour la relier aux récepteurs en quantité avec la batterie déchargée. Cette dernière est ensuite mise en parallèle avec la résistance, puis celle-ci est enlevée du circuit de charge.

Ce système, adopté au secteur Popp, de Paris, exige une quantité d'accumulateurs beaucoup plus considérable que le système précédent, puisque c'est sur les couples secondaires que repose exclusivement l'alimentation des récepteurs. Le succès du système est donc lié aux frais occasionnés par les accumulateurs. En outre, comme ceux-ci ont à débiter toute l'énergie utilisée, le rendement est inférieur à celui des systèmes mixtes exposés précédemment.

M. King a étudié pour la distribution de Chelsea (Londres) un système de commutateurs qui permet d'effectuer automatiquement toutes les manœuvres nécessitées par la substitution des batteries dans le circuit de charge et leur réunion en quantité. Dans l'application à laquelle nous faisons allusion, le courant de charge a une tension de 2 000 volts environ. Pendant que les batteries sont mises en quantité, la station génératrice alimente, dans chaque centre de distribution, un transformateur à courant continu qui concourt avec les accumulateurs à renforcer le courant dans le réseau secondaire.

L'énergie nécessaire pour activer les appareils automatiques est empruntée à des couples mis en opposition dans les réseaux secondaires afin de régler la tension dans ces réseaux.

La fin de la charge d'une batterie est décélée par un couple témoin, dont une des plaques négatives est recouverte d'une cloche équilibrée dans laquelle s'accumule le gaz hydrogène. Lorsque la quantité de gaz dégagée correspond à la charge complète, la cloche bascule et met en jeu les commutateurs servant à la transposition des batteries.

L'avenir dira la confiance qu'on peut avoir dans ce système qui a l'avantage de réduire à l'entretien des accumulateurs la main d'œuvre dans les stations secondaires.

## COMPTEURS ÉLECTRIQUES.

**510.** — Dans une distribution d'eau ou de gaz, la quantité de fluide consommée par un abonné sert de base à l'établissement de la taxe. Dans une distribution électrique, la redevance doit être calculée d'après la quantité d'énergie utilisée.

Toutefois, comme dans la plupart des cas la distribution s'effectue sous une tension sensiblement constante, l'énergie disponible est proportionnelle à la quantité d'électricité fournie. Il suffit donc de disposer un appareil qui totalise cette quantité, pour obtenir une base de taxation convenable. Il résulte de là que la grande majorité des compteurs sont des mesureurs de quantité d'électricité ou des *coulomb-mètres*.

On remarquera que, si le rapport du coefficient de self-induction à la résistance des récepteurs est variable, le retard de phase du courant varie également. Par suite, l'expression de la puissance électrique alternative $\frac{E\,I}{2}\cos\varphi$, § 182, montre que, pour une différence de potentiel efficace constante, l'énergie fournie n'est plus alors proportionnelle à la quantité d'électricité débitée. Dans ce cas, les compteurs-wattmètres seuls donnent des indications correctes.

511. — **Compteur Edison.** — Dans l'hypothèse d'un courant continu le voltamètre est tout naturellement indiqué, puisque le

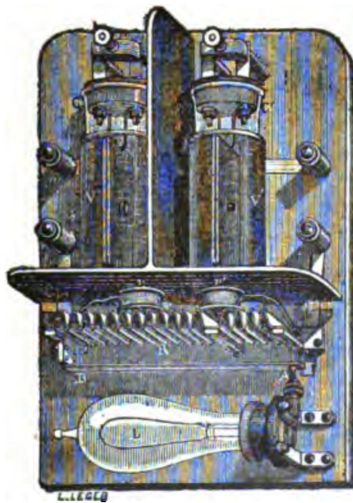


Fig. 293.

dépôt électrolytique est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé cet appareil. Dans les distributions Edison, on

emploie un voltamètre à sulfate de zinc et à électrodes de zinc. Afin d'éviter l'introduction d'une résistance trop considérable dans le circuit principal, le courant qui alimente les récepteurs traverse une bande de maillechort R. Les voltamètres V, V′ sont dérivés sur cette bande; chacun d'eux est en série avec une bobine de fil de cuivre $r$, $r'$. La résistance d'un voltamètre et de la bobine additionnelle est calculée de manière à ce que l'électrolyte soit traversé par la millième partie du courant d'alimentation. Le but des bobines $r$, $r'$ est de compenser les variations de résistance de l'électrolyte. Lorsque la température change, la résistance du liquide varie en sens inverse de celle du cuivre, et des mesures sont prises pour qu'il y ait une exacte compensation. Afin d'empêcher la congélation du liquide, une bilame B ferme le circuit d'une lampe L, lorsque la température décroît trop fortement. La lampe reste allumée jusqu'à ce que la chaleur qu'elle dégage ait ramené la bilame dans la position normale. Chaque mois, un contrôleur retire un des voltamètres qu'il porte à l'usine afin de vérifier l'accroissement de poids de la cathode; pendant ce temps, l'autre voltamètre totalise le courant utilisé par l'abonné.

A part la sujétion de cette manœuvre, l'appareil fonctionne d'une manière très satisfaisante. Il permet de totaliser le débit d'un courant continu variant du simple au décuple, avec une approximation de 2 à 3 pour cent. Cette erreur n'est pas supérieure à celle des compteurs à eau ou à gaz. L'appareil ne s'applique évidemment pas aux courants alternatifs.

512. — **Compteurs Aron.** — Plusieurs distributions électriques utilisent un compteur reposant sur un principe découvert par MM. Ayrton et Perry. Le balancier d'une horloge est terminé par un aimant qui oscille au-dessus d'une bobine traversée par le courant. Celui-ci peut être orienté dans la bobine de manière à agir en sens inverse ou dans le même sens que la gravité et, par suite, à retarder ou à accélérer le mouvement du balancier. Il en résulte un retard ou une avance de l'horloge en rapport avec l'intensité du courant et le temps pendant lequel ce dernier a passé.

Comme la variation est faible, M. Aron a imaginé une disposition ingénieuse pour l'enregistrer avec exactitude. Le compteur contient deux horloges identiques, l'une pourvue d'un balancier ordinaire,

l'autre du balancier magnétique. Les mécanismes de ces horloges sont reliés par un train d'engrenages différentiels qui totalise les différences de vitesse des deux mouvements sur une série de cadrans analogue à celle des compteurs à eau et à gaz. Les changements de




Fig. 294.

température agissant également sur les deux balanciers n'influencent pas sensiblement le compteur. On voit dans un coin de la boite un fil à plomb servant à mettre l'appareil de niveau.

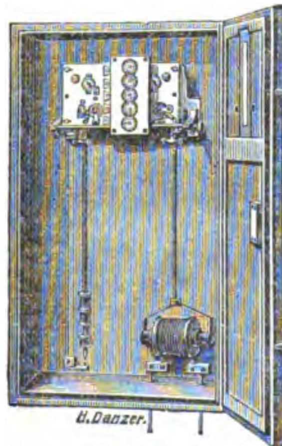


Fig. 295.

Les indications de l'instrument dépendent de la permanence du magnétisme du balancier de droite. Un courant intense, provoqué par exemple par un court-circuit momentané dans l'installation, suffit parfois pour modifier profondément l'aimantation du barreau.

Lorsqu'il s'agit de totaliser l'énergie absorbée par un circuit ou simplement de desservir une distribution par courants alternatifs, on adopte une combinaison reposant sur le principe du wattmètre, fig. 295 La bobine fixe, formée de gros fil et parcourue par le courant utilisé, est placée horizontalement. A l'intérieur de cette bobine oscille une bobine de fil fin supportée par le balancier de droite à l'aide d'un étrier et reliée aux points d'entrée et de sortie du circuit desservant les récepteurs. La variation d'allure des deux mouvements d'horlogerie est proportionnelle à l'action mutuelle des deux bobines, c'est à dire à la puissance moyenne multipliée par le temps.

Des expériences, faites par M. Kapp sur un compteur Aron pour courants continus de 25 ampères, montrent que la constante de l'instrument ne varie que de 0,5 pour 100 en dehors de la constante moyenne, lorsque le courant passe de 0,65 à 25 ampères, la puissance absorbée par l'appareil étant au maximum de 9 watts.

Le compteur pour courants alternatifs présente des constantes différentes suivant la période du courant, à cause de la self-induction de la bobine en dérivation. M. Kapp a reconnu que l'erreur maxima est alors de 1,25 pour 100.

513. — **Compteur Aron pour courants triphasés.** — Considérons une dynamo A alimentant un moteur triphasé B. Appelons $i_1$, $i_2$, $i_3$ les courants circulant à travers les bobines 1, 2, 3 de ce dernier à

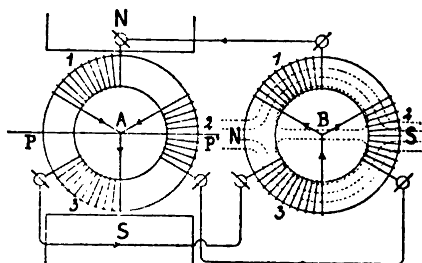



Fig. 296.

un moment quelconque; $e_1$, $e_2$, $e_3$ les différences de potentiel correspondantes aux extrémités de ces bobines.

La puissance électrique dépensée dans le moteur, à l'instant considéré, est

$$p = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3. \qquad (1)$$

Il faudrait trois compteurs-wattmètres si l'on voulait relever la puissance d'après cette formule ou encore un pendule portant trois bobines de fil fin mobiles dans trois bobines de gros fil.

On peut simplifier l'appareil en remarquant que, en vertu des propriétés des courants polyphasés, § 448,

$$e_1 + e_2 + e_3 = o. \qquad (2)$$

D'autre part

$$i_1 + i_2 - i_3 = o. \qquad (3)$$

En éliminant $i_3$ et $e_3$ entre les trois équations, il vient

$$p = e_1 i_1 + e_2 i_2 - (i_1 + i_2)(e_1 + e_2) = -(e_1 i_2 + e_2 i_1).$$

Cette équation, qui est vraie à un moment quelconque, se vérifie également pour les intégrales donnant la puissance moyenne

$$\frac{1}{T}\int_o^T p\, dt = P.$$

On peut donc se borner à fixer au pendule du compteur Aron deux solénoïdes à fil fin réunis, par l'intermédiaire de résistances convenables sans self-induction, aux extrémités des bobines 1 et 2. Ces deux solénoïdes sont placés respectivement dans deux solénoïdes à gros fil parcourus par les courants $i_2$ et $i_1$. Les actions des deux couples d'enroulements s'ajoutent et amènent un retard proportionnel à l'énergie consommée.

514. — **Compteur de Ferranti.** — Cet appareil est un véritable moteur électrique reposant sur le principe de la rotation des liquides dans un champ magnétique. Le champ est engendré par une bobine G traversée par le courant à totaliser et garnie intérieurement et extérieurement de cylindres formés de tôles fines en fer. Dans une cavité, ménagée dans la culasse en fer réunissant ces

cylindres et remplie de mercure, tourne une roue à ailettes dont l'axe engrène avec un mécanisme totalisateur analogue à celui du compteur précédent.

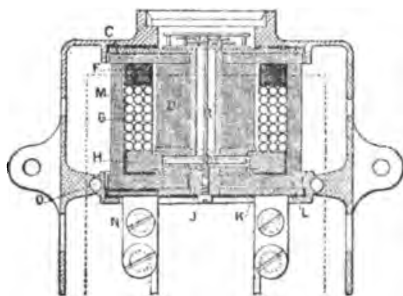



Fig. 297.

Le courant à mesurer traverse le mercure du centre à la périphérie de la cavité, normalement aux lignes de force produites par l'électro-aimant. Le métal liquide prend un mouvement de rotation, et entraîne avec lui la roue à ailettes, en vertu de la force électromagnétique, laquelle est sensiblement proportionnelle au carré de l'intensité du courant. Les résistances de frottement varient comme le carré de la vitesse du mouvement, en sorte qu'il y a proportionnalité entre le courant et la vitesse. Le nombre de tours de la roue mobile totalise par conséquent le courant.

Pour adapter cet appareil à l'enregistrement des courants alternatifs, M. de Ferranti a divisé le noyau de fer de manière à éviter les courants de Foucault.

515. — **Compteur E. Thomson.** — On doit à M. E. Thomson un compteur-wattmètre convenant également aux courants continus et aux courants alternatifs, fig. 298. Deux bobines de gros fil traversées par le courant de circulation servent d'inducteurs à une bobine mobile de fil fin à laquelle on ajoute une résistance extérieure sans self-induction et qu'on place en dérivation sur le circuit utile.

Un commutateur, analogue à celui de la fig. 156, est disposé sur l'axe de rotation vertical de la bobine de fil fin qui prend un mouvement rotatoire sous l'influence d'un couple électrodynamique proportionnel aux watts consommés et équilibré, lorsque

la vitesse de régime est atteinte, par la réaction des courants de Foucault développés dans un disque en cuivre entraîné entre les pôles d'aimants permanents. Afin d'équilibrer les frottements, on a muni les inducteurs d'un enroulement supplémentaire de fil fin,

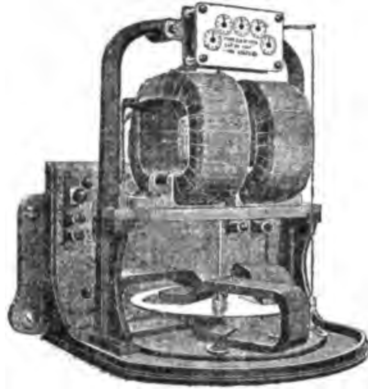


Fig. 298.

disposé en série avec l'induit et parcouru par le courant dérivé. Le nombre de révolutions de cet induit sans fer est enregistré par les aiguilles des cadrans supérieurs.

L'instrument consomme 7,5 watts lorsque la puissance utilisée est 2500 watts; il enregistre dès que cette puissance atteint 10 watts. L'inventeur garantit l'exactitude des indications à $^1/_2$ pour cent près.

**516. — Compteur Schallenberger.** — Le principe du compteur Schallenberger adapté exclusivement aux courants alternatifs a été décrit au paragraphe 193. Un disque mobile en fer, soumis à l'action combinée du courant principal et du courant induit par celui-ci dans une bobine fermée sur elle-même et inclinée de 45° par rapport à la bobine principale, prend un mouvement de rotation régularisé par une roue à ailettes tournant dans l'air. Le nombre de tours s'enregistre comme précédemment sur des cadrans totalisateurs.

Ce compteur et celui de M. de Ferranti, qui sont des coulombmètres, donnent des indications inexactes dans le cas de variations du décalage du courant, § 510.

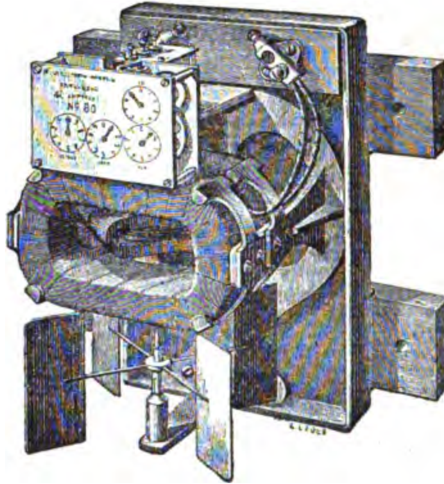


Fig. 299.

**517. — Compteur Frager.** — Le compteur Frager comprend trois parties distinctes :

1° Un ampèremètre ou un wattmètre, dont la déviation est proportionnelle à l'intensité du courant ou à la puissance qu'on veut mesurer.

2° Un mécanisme communiquant un mouvement de rotation lent et continu (un tour par 100 secondes) à une came qui rencontre l'aiguille de l'appareil précédent pendant un temps variable avec l'amplitude de la déviation.

3° Un compteur à cadrans mis en mouvement pendant toute la durée du contact de la came avec l'aiguille indicatrice.

Il résulte de cette combinaison que les cadrans enregistrent des nombres proportionnels aux produits par le temps de l'intensité ou de la puissance indiquée, c'est à dire qu'ils totalisent la quantité d'électricité ou l'énergie fournie.

# CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

---

## LIGNES AÉRIENNES.

518. — **Supports.** — Les lignes aériennes sont supportées par des appuis en bois ou en métal auxquels se fixent des isolateurs servant à l'attache des fils conducteurs.

Les poteaux en bois, généralement employés lorsque les lignes aériennes traversent les campagnes, sont débités hors des troncs des essences résineuses, qui fournissent des supports réguliers. On les injecte de matières antiseptiques, telles que le sulfate de cuivre ou la créosote, qui leur permettent de résister, dans notre climat, pendant une vingtaine d'années à la pourriture et à l'attaque des insectes.

Dans les parties de ligne rectilignes, les poteaux simples suffisent. Dans les courbes, les fils exercent une traction oblique sur les supports. Ceux-ci peuvent être soutenus par des haubans en fil de fer situés dans le plan vertical passant par la résultante des tensions et attachés à une contrefiche plantée obliquement dans le sol. Les haubans peuvent s'oxyder et se rompre; aussi est-il préférable, au point de vue de la durée, d'employer des

jambes de force en bois ou des poteaux assemblés. Les fig. 300 et 301 montrent deux types d'assemblages communément utilisés.

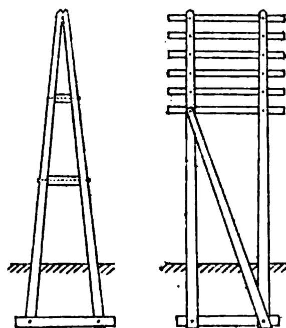


Fig. 300 et 301.

Lorsque les fils sont arrêtés à un support, il convient de donner à ce dernier une grande solidité, par exemple, en formant une pyramide triangulaire au moyen de trois poteaux entretoisés.

En vue d'obtenir une durée plus considérable, particulièrement dans les pays chauds et humides où le bois s'altère rapidement, on a recours aux poteaux métalliques. Les combinaisons les plus simples reposent sur l'emploi de fers cornières, en T, en double T, ou de fers Zorès encastrés dans un socle de béton et portant dans leurs nervures des traverses horizontales qui soutiennent les fils. La fig. 302 montre comment, à l'aide de fers Zorès, on obtient des poteaux creux très rigides. Les poteaux d'angle, soumis à des

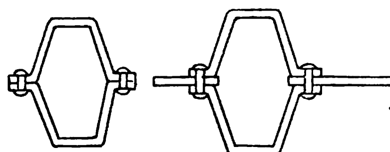


Fig. 302

efforts de renversement, sont consolidés par des nervures en tôle. Ces supports se sont peu répandus à cause de leur prix élevé. Cependant, à l'intérieur des villes, on est souvent obligé de recourir aux supports métalliques, auxquels on peut donner un aspect plus gracieux qu'aux poteaux en bois, par exemple, en

disposant des fers cornières suivant des treillis formant une pyramide tronquée, ou encore en assemblant par emboîtement des tubes de sections décroissantes. Pour les supports peu élevés, on fait usage de colonnes en fonte. Lorsque les fils sont fixés aux habitations, on les supporte par des potelets, en fers profilés, ancrés dans les murs ou dans les charpentes. Dans le cas où les fils sont nombreux, dans les lignes téléphoniques aériennes, on établit des charpentes en fers cornières supportées par des semelles en bois reposant sur les toits. Des haubans consolident

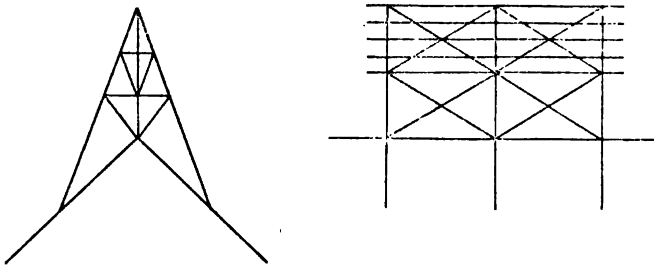


Fig. 3o3.

ces charpentes, lorsque la ligne est coudée. Il faut calculer ces haubans de manière qu'ils puissent subir l'effort qui résulterait de la rupture de tous les fils situés d'un côté de la charpente. Ce cas limite peut se produire à la suite d'un incendie ou d'un ouragan. La fig. 3o3 indique le squelette d'une charpente métallique semblable. Il est bon de surmonter les poteaux de paratonnerres à pointe ou à aigrette, reliés au sol par des conducteurs d'une surface suffisante.

Les isolateurs sont généralement en porcelaine vitrifiée et émaillée. La forme de cloche est adoptée en vue de soustraire une partie de la surface de l'isolateur à l'atteinte de la pluie et d'éviter un dépôt continu d'humidité qui mettrait en communication la tige qui supporte l'isolateur avec le fil fixé au col de celui-ci.

Toutefois la rosée se condense à l'intérieur de la cloche. On retarde cette condensation par l'emploi de cloches doubles qui présentent des cavités profondes soustraites au rayonnement calorifique.

La fig. 3o4 montre la coupe d'un isolateur en porcelaine à

cloche double fixée sur une tige en fer filetée qui s'adapte à une traverse horizontale par un écrou non dessiné.

Il convient, avant de visser la cloche, de recouvrir la tige d'un revêtement d'étoupe ou de toile goudronné, afin d'éviter le bris de la porcelaine lorsque le métal se dilate sous l'influence d'une élévation de température.



Fig. 304.

Le fil conducteur se fixe au col de l'isolateur par une ligature métallique.

La fig. 305 représente un système d'une autre forme qui se fixe latéralement au poteau par une tige recourbée et filetée, les filets

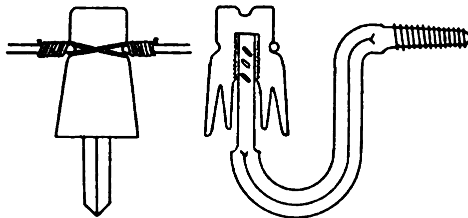


Fig. 305.

venant à la hauteur du col où s'attache le fil conducteur. L'isolateur est maintenu sur sa tige par un scellement au plâtre.

Lorsqu'un isolement très élevé est requis, ce qui est le cas pour les circuits parcourus par des courants de haute tension, de bons

résultats sont obtenus par l'emploi des isolateurs à huile de MM. Johnson et Phillipps, fig. 306. Le bord inférieur de la cloche en porcelaine est recourbé de manière à constituer un réservoir annu-



Fig. 306.

laire qu'on remplit d'huile. Ce bain isolant est une barrière opposée aux déperditions d'électricité superficielles. Il doit être renouvelé parce que l'eau de condensation prend peu à peu sa place.

Pour l'introduction des fils dans les habitations on emploie des tubes isolateurs en porcelaine ou en ébonite, dont l'ouverture extérieure est tournée vers le bas dans le but d'éviter la pénétration de l'humidité dans les locaux.

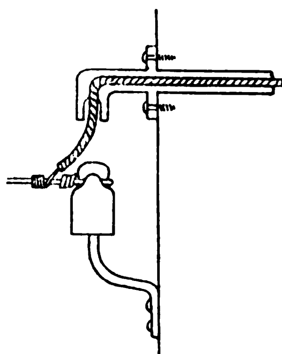


Fig. 307.

519. — **Conducteurs.** — Dans les lignes aériennes qui doivent résister à des efforts résultant de leur poids, ainsi que de la surcharge occasionnée par la neige et par le givre, le cuivre ordinaire ne peut être employé, car sa faible ténacité conduirait à adopter des supports trop rapprochés. La charge de rupture du cuivre pur n'atteint guère, en effet, que 28 kg par mm² (résistance

spécifique : 1,654 microhm-cm à 0° C). On fait usage du bronze phosphoreux inventé par M. George Montefiore, et ainsi dénommé parce que du phosphore est incorporé dans le bronze afin de débarrasser celui-ci de l'oxydule de cuivre et de lui donner de la ténacité. Depuis, M. L. Weiller a produit du bronze silicieux jouissant de propriétés analogues, dues à l'emploi du silicium.

Grâce aux perfectionnements et aux soins apportés dans la fabrication et l'essai des fils de bronze, M. Montefiore est parvenu à produire couramment des fils ayant 97 pour 100 de la conductibilité du cuivre pur et résistant à 45 kg par mm². C'est là le fil type adopté dans la construction des lignes à lumière. Pour les lignes téléphoniques, tendues sur des portées considérables, on force la proportion d'étain et de phosphore, et l'on accroît ainsi la ténacité aux dépens de la conductibilité.

On doit à MM. Farmer et Milliken, aux États-Unis, et à M. Martin, en France, des *fils composés*, formés d'une âme en acier et d'une gaîne de cuivre obtenue par étirage à la filière. On peut donner à ces fils une grande solidité en même temps qu'une conductibilité satisfaisante.

Le fer et l'acier sont encore utilisés dans la construction des lignes télégraphiques, à cause de leur prix peu élevé, mais leur résistance spécifique et leur coefficient de self-induction, § 190, s'opposent respectivement à leur emploi dans les applications à l'éclairage et à la téléphonie. La durée du fer est d'ailleurs très inférieure à celle du bronze, par suite de l'oxydation qui réduit progressivement la section utile du métal. L'oxyde de cuivre forme autour du fil de bronze une pellicule qui préserve les couches intérieures et leur assure une durée illimitée. A conductibilité égale, le fer exige des supports plus résistants et plus rapprochés que le bronze.

Le diamètre des conducteurs employés dans les lignes aériennes ne dépasse jamais 5 mm. Au delà les fils ne sont plus assez maniables et il convient d'avoir recours aux cordes métalliques.

520. — **Calcul de la tension d'un fil aérien.** — Lorsqu'un fil est tendu entre deux appuis A et B, fig. 308, situés au même niveau, il décrit une courbe A D B, connue sous le nom de chaînette. La distance AB s'appelle la portée et la hauteur verticale CD la flèche de la courbe.

On rapporte la chaînette à deux axes de coordonnées rectangulaires. L'axe vertical OY passe par le point le plus bas de la courbe. L'axe horizontal OX est situé à une distance $h$ du point D telle

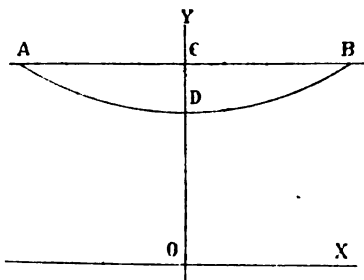



Fig. 308.

qu'en désignant par T la tension du fil en ce point et par $p$ le poids par unité de longueur, on ait la relation

$$h = \frac{T}{p}. \qquad (1)$$

Dans ces conditions et en exprimant par $e$ la base des logarithmes népériens, l'équation de la chaînette devient

$$y = \frac{h}{2}\left(e^{\frac{x}{h}} + e^{-\frac{x}{h}}\right). \qquad (2)$$

En développant le second membre de cette équation suivant la série de Maclaurin, on obtient

$$y = h\left(1 + \frac{x^2}{1.2.h^2} + \frac{x^4}{1.2.3.4.h^4} + \ldots\right).$$

En général, la tension T est très grande par rapport au poids $p$, en sorte que, pour des portées ordinaires, il est permis de représenter la courbe par l'équation

$$y = h + \frac{x^2}{2h}, \qquad (3)$$

ce qui revient à substituer une parabole à la chaînette.

En désignant la portée par $a$, la flèche par $f$, et en posant $x = \frac{a}{2}$, on déduit de (3)

$$y = h + \frac{a^2}{8h} \qquad \text{d'où} \qquad f = \frac{a^2}{8h} = \frac{a^2 p}{8\mathrm{T}}. \qquad (4)$$

Cette dernière relation permet de trouver la flèche d'un fil dont on connaît le poids par unité de longueur, la portée et la tension au point le plus bas. Si l'on se donne la portée, la flèche et le poids, on pourra calculer la tension.

D'après les propriétés de la chaînette, la tension $\mathrm{T_h}$ au point le plus haut est donnée par

$$\mathrm{T_h} = \mathrm{T} + pf. \qquad (5)$$

Sauf dans les cas où la flèche est relativement forte, la tension $\mathrm{T_h}$ ne dépasse pas sensiblement T et l'on peut pratiquement admettre que la tension calculée par la formule (4) représente la tension du fil aux points d'appui.

La longueur du fil est déduite de l'équation

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \qquad (6)$$

En remplaçant $\frac{dy}{dx}$ par sa valeur tirée de (3), on obtient

$$dl = dx\left(1 + \frac{x^2}{h^2}\right)^{\frac{1}{2}} = dx\left(1 + \frac{1}{2}\frac{x^2}{h^2} - \frac{1}{8}\frac{x^4}{h^4} + \ldots\right),$$

équation qui, pour les portées moyennes, se réduit à

$$dl = dx\left(1 + \frac{x^2}{2h^2}\right);$$

d'où

$$l = \int_{-\frac{1}{2}a}^{+\frac{1}{2}a} dx\left(1 + \frac{x^2}{2h^2}\right) = a + \frac{a^3}{24h^2}$$

ou encore

$$l = a + \frac{a^3 p^2}{24 T^2}, \quad (7)$$

relation qui exprime la longueur du fil en fonction de la portée, du poids et de la tension.

Le second terme du binome est généralement très faible relativement au premier. Considérons, par exemple, un fil de bronze phosphoreux de 0,4 cm de diamètre, tendu sous une charge de 80 kg sur une portée de 8 000 cm. Le poids par cm est 0,00112 kg.

On a donc

$$l = 8\,000 + \frac{8\,000^3 \,.\, 0{,}00112^2}{24 \,.\, 80^2} = 8004{,}18 \text{ cm}.$$

On peut mettre l'équation (7) sous la forme suivante, qui montre que la tension croît très vite lorsque la différence entre la longueur et la portée diminue.

$$T = \sqrt{\frac{a^3 p^2}{24 \, (l - a)}}. \quad (8)$$

On a supposé, dans ce qui précède, les points d'appui au même niveau. Dans le cas contraire, le fil affecte toujours la forme d'une chaînette représentée par l'équation (2), l'axe O Y passant par le point inférieur de la courbe, voisin de l'appui le moins élevé. L'équation (5) montre que la tension au point d'appui supérieur est la même que celle qu'on obtiendrait dans l'hypothèse où le fil, au lieu d'être fixé au support inférieur, irait s'attacher en un point situé sur le prolongement de la courbe au niveau du support le plus élevé.

**521. — Influence des variations de température sur le fil.** — La tension du fil, déduite de la formule (4), est celle qu'on observe au moment de la pose. Si la température s'abaisse, le fil tend à se contracter d'une quantité proportionnelle à la chute de température. Mais l'élasticité du fil lui permet de s'allonger sous l'influence de l'accroissement de tension résultant de la contraction,

et il résulte de ces deux effets combinés une tension résultante facile à calculer.

Outre l'effet de contraction qu'il occasionne, le refroidissement de l'air détermine parfois sur le fil un dépôt de givre qui accroît très notablement l'effort de traction. C'est pourquoi il convient de régler la tension donnée au fil au moment de la pose, de manière que la charge due à la contraction occasionnée par les plus grands froids ne dépasse pas un tantième de la charge de rupture, qu'on appelle la *tension limite*. Cette tension limite est souvent prise égale au quart de la charge de rupture, la limite d'élasticité correspondant environ au tiers de la charge de rupture. Ainsi, un fil de bronze phosphoreux de 0,4 cm de diamètre, dont la section est 0,126 $cm^2$ et le poids 0,00112 kg par cm, peut résister à une charge de $4500 \times 0,126 = 567$ kg et la tension limite est d'environ 142 kg. Cette valeur ne devra pas être dépassée par les plus grands froids qui, dans notre pays, correspondent à — 20° C environ. D'autre part, la tension ne doit pas descendre en dessous du 1/6 de la charge de rupture, sinon la flèche augmente au point d'exposer les fils voisins à se mélanger.

Appelons T la tension limite à la température minima et proposons-nous de calculer la tension T' à donner au fil posé sous une température θ° différant de $t$° de la température minima.

Soient $\delta$ le coefficient de dilatation par degré centigrade, $\varepsilon$ l'allongement élastique proportionnel pour une surcharge de 1 kg par $cm^2$.

Pour le bronze phosphoreux on a

$$\delta = 0,000\,016$$
$$\varepsilon = 0,000\,000\,78.$$

Pour le fer,

$$\delta = 0,000\,012$$
$$\varepsilon = 0,000\,000\,34.$$

Pour une élévation de température de $t$ degrés, on observerait, dans l'hypothèse d'un fil libre de longueur $l$, une dilatation égale à $\delta\, l\, t$ et la longueur deviendrait $l\,(1 + \delta\, t)$.

Mais, comme les extrémités du fil sont fixées invariablement, la tension primitive T décroît et prend une valeur T'. L'effet de l'élas-

ticité détermine un raccourcissement de $\varepsilon \frac{T - T'}{s}$ par cm, $s$ désignant la section du fil.

Soit $\frac{\varepsilon}{s} = \varepsilon'$.

La longueur définitive du fil sera donc

$$l' = l(1 + \delta t)\left[1 - \varepsilon'(T - T')\right] = a + \frac{a^3 p^2}{24\, T'^2}. \qquad (9)$$

Mais on a

$$l = a + \frac{a^3 p^2}{24\, T^2}. \qquad (10)$$

En retranchant (10) de (9) et remarquant que le produit $\delta t$ est négligeable, il vient

$$l\,\delta t - l\,\varepsilon'(T - T') = \frac{a^3 p^2}{24}\left(\frac{1}{T'^2} - \frac{1}{T^2}\right).$$

En général, la longueur $l$ est très peu différente de la portée $a$, de sorte qu'on peut écrire

$$\delta t - \varepsilon'(T - T') = \frac{a^2 p^2}{24}\left(\frac{1}{T'^2} - \frac{1}{T^2}\right), \qquad (11)$$

équation du troisième degré en $T'$, qu'on résoud aisément au moyen de la règle à calcul, en appliquant la méthode de M. Cloeren, déjà utilisée à la page 628 du tome I.

Lorsqu'il s'agit de poser une ligne à l'aide d'un fil donné, on calcule à l'avance les valeurs de $T'$ correspondant à des températures et à des portées graduellement croissantes. Une simple interpolation permet alors de trouver la tension à adopter pour une portée et une température déterminées.

On remarquera que, pour une tension donnée, l'effet de la température est d'autant plus important que la portée est plus faible; on doit donc se préoccuper d'autant plus de l'influence de cet élément que les supports sont plus rapprochés.

Les tables suivantes, calculées par M. Barbarat, supposent que le fil atteint le 1/5 de la charge de rupture à + 10° C, convention admise par le Congrès des Électriciens de 1889.

| | TENSIONS EN KG PAR MM². | TEMPÉRATURES CORRESPONDANT AUX PORTÉES DE | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 60 m. | 80 m. | 100 m. | 150 m. | 200 m. | 300 m. |
| Fil de bronze supportant 45 kg par mm². | 12,8 | — 11,9 | — 15,3 | — 19,6 | — 34,8 | — 56,0 | |
| | 11,2 | — 3,2 | — 5,6 | — 8,6 | — 19,4 | — 34,3 | |
| | 10,0 | + 3,9 | + 2,6 | + 1,0 | + 4,6 | + 12,7 | |
| | 9,0 | + 10,0 | + 10,0 | + 10,0 | + 10,0 | + 10,0 | |
| | 8,1 | + 15,5 | + 16,9 | + 18,7 | + 24,9 | + 33,5 | |
| | 7,5 | + 20,5 | + 23,4 | + 27,2 | + 40,3 | + 58,5 | |
| Fil de bronze supportant 75 kg par mm². | 21,4 | | — 22,6 | — 24,3 | — 30,2 | — 38,5 | — 57,5 |
| | 18,7 | | — 9,3 | — 10,6 | — 14,7 | — 20,6 | — 33,9 |
| | 16,6 | | + 1,4 | + 0,7 | + 1,5 | + 4,6 | + 11,6 |
| | 15,0 | | + 10,0 | + 10,0 | + 10,0 | + 10,0 | + 10,0 |
| | 13,6 | | + 17,4 | + 18,1 | + 20,6 | + 24,0 | + 31,8 |
| | 12,5 | | + 23,9 | + 25,4 | + 30,5 | + 37,7 | + 54,0 |
| Fil de fer supportant 40 kg par mm². | 13,3 | — 21,0 | — 27,0 | — 34,8 | | | |
| | 11,4 | — 11,3 | — 16,1 | — 22,3 | | | |
| | 10,0 | — 3,1 | — 6,5 | — 10,9 | | | |
| | 8,8 | + 3,7 | + 1,9 | — 0,4 | | | |
| | 8,0 | + 10,0 | + 10,0 | + 10,0 | | | |
| | 7,2 | + 15,7 | + 17,7 | + 20,2 | | | |
| | 6,6 | + 21,1 | + 25,2 | + 40,5 | | | |

522. — **Projet d'une ligne aérienne.** — Nous résumons dans le tableau ci-après les qualités des métaux principaux employés dans la construction des lignes.

| NATURE DU MÉTAL. | CHARGE DE RUPTURE EN KG PAR MM². | RÉSISTANCE D'UN FIL DE 1 MM. DE DIAMÈTRE ET 1 KM. DE LONGUEUR, EN OHMS A 0° C. | POIDS EN KG PAR KM. |
|---|---|---|---|
| Cuivre pur. . . . . . . . . | 28 | 21 | 7,05 |
| Bronze de haute conductibilité pour éclairage électrique . . | 45 | 21,7 | Id. |
| Bronze télégraphique . . . . | 50 | 25,7 | Id. |
| Bronze téléphonique . . . . | 75 | 68,5 | Id. |
| Fer au bois . . . . . . . | 56 | 135 | 6,12 |
| Acier Bessemer . . . . . . | 40 | 156 | Id. |

Soit à construire une ligne aérienne, composée d'un certain nombre de fils dont la section et la nature sont connues et déterminées par des conditions électriques et mécaniques. On s'impose généralement aussi la hauteur des supports. Connaissant ces éléments, on peut calculer :

1° La tension à adopter au moment de la pose, en tenant compte de la nature des conducteurs, de leur section et de la température. Il faut que, par les plus grands froids, la tension ne puisse atteindre sa valeur limite. Sur les plateaux exposés, le givre s'accumule autour des fils pendant l'hiver et décuple parfois le poids des lignes, ce qui conduit à réduire la tension des fils au moment de la pose.

2° La portée normale en ligne droite. Si l'on se donne la hauteur minima des fils au-dessus du sol, le nombre des fils, leur écartement et la hauteur des poteaux, on en déduit la flèche permise et partant la portée.

On a, en effet,

$$f = \frac{a^2 p}{8\,T}, \quad \text{d'où} \quad a = \sqrt{\frac{8\,T f}{p}},$$

$a$ étant la portée, $p$ le poids du fil par unité de longueur et T la tension. Il est bon de prévoir, dans le calcul, la place pour quelques fils supplémentaires.

On pourrait renverser le problème en se donnant la portée et calculer la flèche et la hauteur des supports.

L'écartement des fils d'une même ligne varie de 30 à 50 cm. Les portées normales, réduites à 50 m avec les gros fils de bronze de haute conductibilité, atteignent 80 à 100 m avec les fils télégraphiques en fer et en bronze et vont jusque 300 mètres et au delà avec les conducteurs téléphoniques en bronze de grande ténacité.

Dans les courbes, on ne peut généralement pas conserver la portée normale, parce que l'effort de renversement exercé sur les poteaux croît rapidement quand le rayon de la courbe diminue. En outre, le long des chaussées, les fils pourraient gêner la circulation. On emploie ordinairement dans les courbes les poteaux assemblés, § 518.

Représentons par AB et BC les deux portées successives, par BE et BF les tensions T exercées des deux côtés du support B et

par BG la résultante F. Comme le triangle isocèle BFG est semblable à BOC, on a, en désignant par $r$ le rayon de la courbe et par $a$ la portée,

$$a = r \frac{F}{T},$$

condition qui donne la portée limite à adopter.

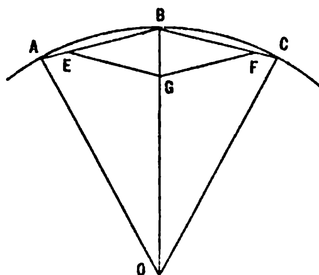



Fig. 309.

L'effort auquel peut résister un poteau encastré à la base se détermine en égalant le moment fléchissant dû à cette force au moment résistant au point d'encastrement. Avec les bois résineux, la décroissance de la section est telle que, si la condition précédente est satisfaite pour la section d'encastrement, elle l'est également pour toute autre section au dessus du sol.

Soient F l'effort, $h$ son bras de levier par rapport au sol, R le coefficient de résistance ou l'effort limite admis (600 kg par $cm^2$ pour le sapin), $d$ la distance de la fibre la plus fatiguée à la ligne des fibres invariables et I le moment d'inertie de la section; la condition susdite est $Fh = \frac{RI}{d}$.

Deux poteaux jumellés résistent comme si l'intervalle qui les sépare était plein.

Dans l'étude du tracé d'une ligne, différentes considérations entrent en jeu. A moins que des tensions électriques dangereuses ne portent à éloigner les fils autant que possible des voies fréquentées, on cherche à suivre les chemins de fer ou les chaussées, afin de faciliter la construction, la surveillance et l'entretien de la ligne. Les matériaux peuvent alors être amenés aisément à pied d'œuvre

et l'inspection se fait rapidement par un agent circulant dans le fourgon d'un train ou dans une voiture publique. On préfère les routes abritées aux routes découvertes en vue d'éviter le vent et le givre qui constituent les grands ennemis des lignes aériennes. Lorsque les routes décrivent des lacets nombreux, on peut éviter les détours en plantant quelques supports dans les terrains avoisinants. Si le chemin traverse une vallée profonde, il est possible de réaliser une économie de pose sérieuse en reliant les deux crêtes par une seule portée et en donnant au fil une flèche considérable de manière à ne pas exagérer sa tension.

Pour calculer la portée limite d'un fil, rappelons que la tension aux points d'appui est donnée par, § 520,

$$T_h = T + pf = \frac{a^2 p}{8f} + pf. \qquad (1)$$

La tension $T_h$ décroît quand $f$ augmente jusqu'à une valeur définie par la condition

$$\frac{dT_h}{df} = o, \text{ d'où } a^2 = 8f^2;$$

c'est à dire que le minimum correspond à une flèche égale au tiers environ de la portée. En introduisant cette valeur dans l'équation (1), il vient

$$T_h = \frac{3ap}{8} + \frac{ap}{3} = 17\frac{ap}{24}, \text{ d'où } a = \frac{24\,T_h}{17\,p}.$$

Soit un fil de bronze téléphonique de 1 mm de diamètre, dont la tension limite est voisine de $\frac{75}{5} = 15$ kg à 10° C et le poids par mètre 0,007 kg. En remplaçant, on a

$$a = \frac{24 \times 15}{17 \times 0{,}007} = 3025.$$

Pratiquement, on a fait des portées d'un kilomètre qui ont parfaitement résisté.

Il ne faut pas perdre de vue que ces grandes portées rendent les réparations difficiles en cas de bris du fil ; elles ne sont pas possibles s'il y a plusieurs fils de ligne exposés à se mélanger lorsqu'ils sont ballotés par le vent.

Les poteaux doivent autant que possible être plantés sur les points

culminants pour éloigner les fils du sol. La hauteur minima des fils côtoyant les routes est de 3 m. Cette hauteur est portée à 4,5 m lorsque la ligne surplombe ou traverse la chaussée, ou lorsque des chariots chargés de céréales doivent passer de la route dans les champs voisins. Le long des chemins plantés d'arbres, les poteaux doivent être placés sur les talus extérieurs en vue d'éviter les contacts des fils avec les branches.

Dans les villes, les hauteurs minima sont de 6 m et plus, suivant les règlements locaux. Les fils y sont souvent attachés à des potelets ou à des charpentes métalliques fixées aux maisons. Il faut éviter que les vibrations des fils ne se communiquent aux charpentes des toits, sinon elles occasionnent un bruit très désagréable. Les *sourdines* peuvent consister en fils de plomb, de 2 à 3 mm de diamètre, enroulés en spires serrées sur le conducteur, de chaque côté de l'isolateur, sur une longueur de 40 à 50 cm. Le plomb couvrant ainsi un ventre de vibrations empêche celles-ci de se transmettre. Un autre moyen est de fixer à l'isolateur deux bouts de chaîne auxquels on relie les deux tronçons de la ligne dont la continuité est assurée par un fil de cuivre souple contournant l'isolateur. Les maillons de la chaîne interceptent les vibrations.

Aux traversées des voies navigables, les conducteurs doivent être exhaussés à 18 m pour permettre le passage des mâts des bateaux. Souvent on préfère arrêter la ligne aérienne et y raccorder un câble immergé dans le cours d'eau.

Lorsque les fils longent la banquette d'une voie de chemin de fer, toujours bien surveillée, la hauteur minima peut être réduite à 2 m. Elle doit atteindre 4,50 m à 5 m aux traversées de voies. Dans ce dernier cas, on recommande de croiser le chemin de fer normalement à l'aide de deux poteaux d'arrêt placés en face l'un de l'autre, afin que, si les fils viennent à se briser, ils ne tombent pas sur la voie mais soient ramenés vers les supports par leur élasticité. Le plan vertical qui passe par les fils côtoyant la voie ferrée doit tomber à 1,50 m au moins du rail extérieur, afin que les conducteurs ne puissent toucher les véhicules d'un train. Cette condition oblige, lorsque la ligne suit le bord convexe d'une courbe, à planter les poteaux sur le talus extérieur de la voie, sinon les portées seraient trop courtes. La traversée d'un tunnel peut se faire par des câbles. Mieux vaut l'éviter par l'établissement de lignes

aériennes contournant la montagne en longeant la route qui existe presque toujours en pareil cas.

523. — **Construction d'une ligne aérienne.** — Le projet d'une ligne aérienne étant effectué en ayant égard aux circonstances locales, il reste à examiner les conditions d'exécution. Les règles suivantes, adoptées dans la construction des lignes télégraphiques, s'appliquent avec quelques restrictions aux autres lignes extra-urbaines.

Les matériaux ayant été amenés à pied d'œuvre, soit par train, soit sur chariot, suivant que la ligne longe une voie ferrée ou une route, une brigade de 10 à 12 hommes procède à la plantation des poteaux. Six hommes, par exemple, creusent les fosses, deux hommes fixent les isolateurs sur les poteaux et le reste de l'atelier s'occupe de la plantation proprement dite.

Dans les terrains meubles, les poteaux de 6 m à 7,50 m sont enfouis à 1,50 m, les poteaux de 8 à 10 m à 2 m et les poteaux de 12 m et au-delà à 2,50 m. Dans le roc, on se contente de trous de 0,60 m, mais on scelle les poteaux au mortier de chaux.

En terrain meuble, les trous se creusent ordinairement à la pioche et à la pelle, en poussant parallèlement à la ligne une tranchée aussi étroite que possible et qui descend en gradins à la profondeur voulue. Le poteau s'appuie ainsi dans le sens normal aux conducteurs sur des terres non remuées. Dans les terrains peu consistants, on peut aussi faire usage de tarières héliçoïdales pour creuser les trous et ramener les terres de déblai, réduites au minimum.

Le poteau ayant été dressé dans l'orifice creusé, on le consolide à la base par de grosses pierres et l'on dame la terre de déblai par couches de 10 à 15 cm.

L'avancement d'une brigade de 12 hommes est de 3 kilomètres par jour en terrain ordinaire, à raison d'une douzaine de supports par kilomètre.

Un atelier de 6 hommes procède à la pose des conducteurs, à raison de 10 kilomètres de fil par jour. Le fil, fourni par rouleaux, est déroulé sur le sol en évitant les boucles ou coques qui se forment parfois, lorsque le fil tombe du rouleau en hélices. Dans ce cas, le conducteur se tord une fois sur lui-même sur la longueur correspondant à un tour de fil. Pour prévenir cette torsion, l'ouvrier qui avance avec le rouleau fait exécuter une révolution à ce dernier à

chaque tour déroulé. Mieux vaut mettre le fil sur une bobine qu'on fait rouler sur le sol, ou encore placer le rouleau sur un dévidoir porté par une brouette qu'on traîne dans le sens de la ligne.

A mesure que les rouleaux sont développés, les bouts de fil successifs sont ligaturés. Ces joints doivent être faits avec soin aux points de vue mécanique et électrique, car ils constituent souvent une

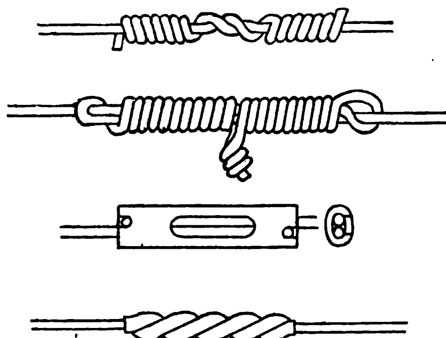


Fig. 310, 311, 312 et 313.

partie faible des lignes. Les gros fils de fer ou d'acier peuvent être réunis par le joint à double torsade représenté dans la fig. 310. Pour assurer la continuité électrique de la ligne, on plonge le joint tout entier dans un bain de décapage, puis dans la soudure.

Avec les fils de bronze, plus élastiques, le joint précédent se déroulerait sous l'effort de traction. En outre, la soudure par immersion de la ligature déforcerait le métal et amènerait sa rupture; il convient de souder en un point qui n'a pas à supporter d'effort mécanique. On peut faire la torsade en ramenant le fil en arrière comme dans la fig. 311, de manière que les spires tendent à se resserrer par la traction. Les bouts libres sont soudés en dehors de la ligature.

Dans tous les cas, il est possible d'appliquer le joint par manchon, d'une exécution plus simple. Un manchon du même métal que le conducteur, fig. 312, est passé sur les fils qui sont pliés à l'extrémité. Une goutte de soudure coulée dans l'orifice du manchon suffit par assurer la conductibilité. On utilise avec le bronze des soudures à base de bismuth, fondant à basse température.

Le joint Mac Intire, fig. 313, comporte deux tubes brasés l'un contre l'autre et dans lesquels on introduit à frottement les bouts à réunir. Au moyen d'outils spéciaux, on tord les tubes. On obtient ainsi un contact intime avec le conducteur, qui évite la soudure.

Les ligatures finies sur la distance d'un kilomètre, le fil est placé sur les tiges des isolateurs, à l'aide d'échelles, et fixé par un bout. L'autre bout du conducteur est tendu, à bras d'homme d'abord, puis au moyen d'une pince à mâchoires faisant partie d'un dynamomètre à ressort, fig. 314, dont la tige mobile est reliée à une paire de

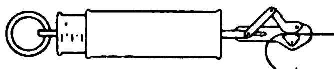


Fig. 314.

mouffles qui permettent de donner la tension choisie. Il faut avoir soin de frapper sur le fil, en plusieurs points intermédiaires, pendant qu'on le tend, sinon, par suite du frottement du fil sur les isolateurs, les portées les plus rapprochées des moufles seraient plus tendues. On fixe ensuite le conducteur sur chaque isolateur au moyen de fil à ligatures. Les dentures des mâchoires et des pinces destinées à saisir le fil de bronze doivent être appropriées au diamètre du fil; si l'on serrait un fil mince entre des mâchoires à forte denture, on le briserait.

Dans les villes, les portées sont très grandes et le déroulement des fils sur le sol gênerait la circulation. On attache, entre les supports voisins, un fil solide sur lequel on fait rouler un petit chariot, auquel est attachée l'extrémité du fil à dérouler. On peut ainsi développer successivement les divers conducteurs.

## CANALISATIONS A ENVELOPPES PROTECTRICES.

524. — **Généralités.** — Les canalisations souterraines peuvent être formées de conducteurs dépourvus de tout revêtement et placés sur des isolateurs, à la façon des lignes aériennes, dans une conduite ou caniveau, ou encore de conducteurs entourés d'une gaîne diélectrique continue et protégés contre les outils des terrassiers et

les tassements du sol, soit par une armature métallique posée directement sur l'enveloppe isolante, soit par une conduite résistante dans laquelle les câbles sont placés.

Lorsque les conducteurs dépassent un certain diamètre, on les compose souvent de fils de cuivre cordés, afin de leur donner de la souplesse et de leur permettre de céder aux dilatations provenant des variations de la température. Ce procédé augmente, en outre, la surface de refroidissement des fils et leur permet de supporter des densités de courant plus grandes que celles tolérées dans un conducteur unique de même section. Si l'on fait usage de barres massives de forte section, on réserve aux joints des conducteurs plus souples en vue des dilatations. La règle généralement admise est de souder les joints des conducteurs; cependant lorsque ceux-ci présentent de larges surfaces de contact étamées, on se contente de joints plats serrés par des vis.

525. — **Cas des courants alternatifs.** — Un conducteur parcouru par des courants alternatifs développe autour de lui un champ magnétique variable qui peut créer, dans les masses conductrices voisines et dans l'armature protectrice, des courants induits, aux dépens d'une fraction de l'énergie produite par la source électrique. En outre, s'il existe des circuits téléphoniques à proximité, les courants induits apportent des perturbations dans les communications échangées par ces fils.

On combat cet inconvénient en rapprochant les deux conducteurs composant le circuit parcouru par les courants alternatifs, car, de cette manière, les courants voisins de sens opposés tendent à produire des effets antagonistes dans les fils et les masses métalliques.

On parvient à éviter complètement l'inconvénient signalé en faisant usage de deux conducteurs concentriques, car dans ce cas chacun des conducteurs développe à l'exterieur du système le même champ magnétique que s'il était concentré dans l'axe commun. Il en résulte que les lignes de force exterieures au système se neutralisent et que le champ magnétique est concentré entièrement dans l'espace annulaire isolant. On en a la preuve dans ce fait qu'un tel système n'exerce aucun effet sur une aiguille aimantée.

On se rappelle que les courants alternatifs n'ont pas la même densité dans toute la masse des conducteurs, la densité allant en décroissant de l'extérieur vers l'intérieur, § 190, ce qui tend à faire substituer des tubes aux conducteurs pleins, lorsque le diamètre dépasse 1 à 1,5 cm. Le système concentrique se prête à la combinaison de deux tubes co-axiaux. Cette disposition a, en outre, l'avantage de diminuer le danger qu'offre le contact des conducteurs, attendu qu'on ne peut toucher les deux conducteurs à la fois. M. de Ferranti a proposé de mettre le tube extérieur en communication avec la terre à l'une de ses extrémités. On peut ainsi toucher ce conducteur sans éprouver de secousse dangereuse, lors même que le conducteur intérieur est à un potentiel très élevé. Enfin la quantité de matière diélectrique nécessaire à l'isolement des deux conducteurs entr'eux est réduite au minimum dans ce dispositif.

M. Jacquin a fait des expériences en vue de déterminer la perte résultant de l'induction latérale dans le cas d'emploi de câbles séparés et garnis d'armatures métalliques pour les circuits traversés par des courants alternatifs. Les essais ont porté sur des câbles garnis d'une enveloppe de plomb de 1 mm d'épaisseur, puis sur des câbles présentant, au dessus de l'enveloppe de plomb, une armature composée de fils de fer de 3 mm de diamètre.

Lorsque des courants alternatifs traversent des câbles semblables, il se produit des phénomènes d'induction et, dans le second cas, des phénomènes magnétiques qui absorbent une fraction de l'énergie produite par la source électrique. Si ces phénomènes n'intervenaient pas, la production d'une intensité efficace $I_{eff}$ dans un conducteur de résistance R ne demanderait qu'une force électromotrice $I_{eff}$ R. Mais comme les actions secondaires développent une force électromotrice antagoniste, la force électromotrice $E_{eff}$ nécessaire pour entretenir le courant $I_{eff}$ est supérieure au produit ci-dessus. La puissance P dépensée dans le conducteur peut se mesurer à l'aide d'un wattmètre dépourvu de self-induction, § 245, en même temps qu'on évalue l'intensité efficace par un électrodynamomètre, ce qui permet de calculer la puissance P′ transformée en chaleur dans le conducteur :

$$P' = I^2_{eff} R.$$

La différence $P'' = P - P'$ est la puissance dissipée dans l'enveloppe métallique du câble.

La perte est maxima lorsque l'enveloppe du câble est disposée de manière à constituer un circuit fermé, c'est à dire lorsqu'on relie métalliquement les deux extrémités de la gaîne métallique. Dans ces conditions, M. Jacquin a obtenu, pour le câble sous plomb, une perte variant entre 1 et 2 pour 100 de la puissance dépensée P. Dans le cas d'un câble sous plomb à armature de fer, la perte s'est élevée à 35 pour 100 lorsque les extrémités des enveloppes métalliques étaient réunies et que celles-ci formaient des circuits fermés. Dans ce but, le câble était enroulé sur une bobine et les deux bouts ramenés l'un près de l'autre. On constitue de cette manière une sorte de bobine d'induction dont le conducteur secondaire est concentrique au conducteur primaire.

En réalité, la perte n'atteint jamais cette valeur en pratique, attendu que les extrémités de l'armature ne peuvent communiquer entr'elles que par les contacts très imparfaits de celle-ci avec le sol. D'ailleurs, comme la puissance dépensée dans les conducteurs d'une distribution à haute tension n'atteint jamais 5 pour 100 de la puissance totale utilisée, le surcroît de perte occasionné par l'induction ne dépasse pas, dans le cas le plus défavorable, $0,35 \times 0,05$ soit 1,75 pour 100 de la puissance totale.

La fréquence de l'alternateur était égale à 100 dans ces expériences. La perte croît naturellement avec la fréquence.

M. Jacquin fait remarquer qu'on réduit la perte à une proportion insignifiante en plaçant les deux câbles sous plomb servant à un circuit dans une même armature en fer, car, dans ce cas, les lignes de force produites par les courants opposés circulant dans ces conducteurs déterminent des effets antagonistes qui s'équilibrent en partie. De plus, une armature en fer continue, telle qu'un tuyau, sert d'écran pour les lignes de force, car, par suite de la perméabilité du métal, celles-ci ont une tendance à s'y condenser. Il en résulte que les lignes téléphoniques qui passent à proximité sont alors moins exposées à l'action inductrice.

**526. — Substances employées pour l'isolement des câbles. Caoutchouc.** — Avant d'étudier les dispositions adoptées pour assurer l'isolement des canalisations souterraines, nous croyons utile de donner quelques détails sur les matières isolantes les plus employées dans des cas semblables.

Parmi ces substances figure en première ligne le caoutchouc. On donne ce nom à une gomme qu'on trouve en suspension dans la sève de plusieurs essences d'arbres tropicales. Pour extraire la gomme, il suffit de faire évaporer la partie liquide de la sève. Le caoutchouc brut se compose de deux éléments, l'un nerveux et solide, l'autre visqueux. Grâce à ce dernier, la gomme possède la propriété remarquable de se souder à elle-même par pression. Mais la matière visqueuse rend le caoutchouc altérable à l'air et fusible à basse température. Pour éviter cet inconvénient, on incorpore dans le caoutchouc 10 à 11 pour 100 de soufre qui, sous l'influence de la chaleur, a la propriété de transformer la matière visqueuse en matière nerveuse.

Le caoutchouc pur est un hydrocarbure, mais le caoutchouc du commerce contient de la résine, de l'eau et des matières minérales. Avant d'employer la matière, on élimine les impuretés les plus grossières en la coupant mécaniquement en menus fragments qu'on lave dans un courant d'eau froide. On évapore ensuite à l'étuve sèche l'humidité contenue dans les fragments, puis on y incorpore du soufre, soit sous forme de fleur de soufre (caoutchouc blanc), soit sous forme de sulfure d'antimoine (caoutchouc rouge). On ajoute aussi d'autres substances, telles que la chaux, l'argile, le plâtre, etc., qui ont pour but d'abaisser le prix du mélange. L'incorporation de toutes ces matières se fait dans un masticateur. On comprime ensuite la masse sous la presse hydraulique, de manière à la réduire en blocs qu'on débite sous forme de lanières.

On façonne les objets de caoutchouc par couches successives réunies par pression, puis on les porte dans une étuve chauffée entre 130° et 140°. Sous l'influence de la chaleur, le soufre s'unit au caoutchouc et donne une masse, connue sous le nom de *caoutchouc vulcanise*, douée d'une grande élasticité qu'elle conserve jusque 180°. Dans cet état, la substance ne se soude plus à elle-même et elle résiste aux dissolvants ordinaires du caoutchouc. Lorsque la proportion de soufre atteint 30 à 35 pour 100 et qu'on y ajoute 3 pour 100 de noir de fumée, on obtient l'*ébonite* ou *vulcanite*, substance noire, dure, susceptible de se polir, de se travailler aux outils et jouissant d'un pouvoir isolant très considérable.

Les conducteurs isolés au caoutchouc vulcanisé peuvent être

étamés pour éviter l'attaque du cuivre par le soufre. On évite toute détérioration en revêtant le cuivre d'une couche de caoutchouc naturel au dessus de laquelle on place les couvertures de caoutchouc vulcanisé. On atténue l'attaque des métaux par le caoutchouc vulcanisé en incorporant dans ce dernier, pendant la fabrication, une certaine proportion de chaux.

Pour obtenir la gaîne isolante, on enroule en hélices autour du conducteur des lanières de caoutchouc dont les spires se recouvrent légèrement et se soudent par les bords. La vulcanisation se fait après le recouvrement. On confectionne aussi des tissus imprégnés de caoutchouc, qu'on découpe en bandelettes pour le revêtement des conducteurs. Les gaînes obtenues par ce procédé ne sont pas complètement imperméables par suite des défauts que peut présenter la soudure.

Chauffé à 200°, le caoutchouc vulcanisé devient poisseux et ne reprend plus son élasticité après refroidissement ; aussi doit-on éviter dans la fabrication et l'exploitation des câbles isolés d'exposer la gaîne à atteindre la température de fusion.

On est cependant arrivé à faire des gaînes de caoutchouc sans soudure, par le procédé qui sert à produire les tuyaux. La matière est engagée dans un tube conique à doubles parois chauffées à la vapeur et forcée, par une vis creuse traversée par le conducteur, à sortir en formant une gaîne continue autour de ce dernier.

Les conducteurs revêtus de caoutchouc doivent être assez flexibles pour que la couche isolante ne soit pas blessée lorsqu'on courbe le câble. Si l'on doit employer des sections de cuivre considérables, on forme le conducteur de brins de cuivre cordés, ce qui lui donne de la souplesse. On peut recouvrir cette corde d'un ruban de coton afin de préserver mieux encore la gaîne de caoutchouc. L'épaisseur de celle-ci varie avec la tension électrique. M. Preece admet qu'elle doit être d'au moins 1 millimètre pour une tension de 500 volts et augmenter de 0,5 millimètre par 500 volts supplémentaires.

En tous cas, la gaîne doit être essayée avant l'emploi. On soumet le conducteur à une tension double de celle qu'il devra supporter dans l'application à laquelle on le destine. On utilise dans ce but des bobines d'induction à l'aide desquelles on obtient aisément des différences de potentiel considérables.

Les câbles isolés au caoutchouc vulcanisé s'altèrent très peu à l'air. Mais ils ne peuvent être employés sous l'eau à de grandes profondeurs, car le caoutchouc absorbe sous pression jusque 25 pour 100 d'eau.

527. — **Gutta-percha. Revêtement d'un câble sous-marin.** — C'est la raison pour laquelle les câbles immergés dans l'eau sont généralement isolés à l'aide d'une autre gomme, la gutta-percha, qui jouit d'une imperméabilité exceptionnelle. La plupart des câbles télégraphiques sous-marins utilisent ce diélectrique.

La gutta-percha provient d'un arbre, appelé *Isonandra-gutta*, qui croît surtout dans la Malaisie. Le suc évaporé de cette essence contient beaucoup d'impuretés, telles que pierrailles, écorces, sucs d'essences différentes, ajoutées par les indigènes soit avec intention, soit par ignorance.

Les pains de gutta-percha de bonne qualité se reconnaissent à une texture fibreuse et à une couleur rosée. Malheureusement, ce dernier indice peut s'obtenir artificiellement par des matières colorantes, en sorte que le seul moyen certain de juger la valeur de la gomme est de la préparer et de mesurer les qualités électriques d'un bout de câble d'essai.

La gutta-percha a le défaut de se ramollir à une température assez basse, vers 37° C, ce qui ne permet pas de l'employer pour isoler les conducteurs servant à l'éclairage, lesquels peuvent être portés par le courant à une température plus élevée. De plus, elle est altérable à l'air, particulièrement sous l'action de la lumière : elle se résinifie et se fendille. Il ne faut jamais l'employer dans la fabrication des câbles aériens.

Avant l'emploi de la gutta-percha, on fait subir à celle-ci l'épuration mécanique suivante :

Les pains sont réduits en copeaux à l'aide d'un plateau armé de dents, analogue à un coupe-racines. Les fragments obtenus tombent dans une cuve d'eau chauffée à la vapeur, où la gutta-percha remuée par un agitateur se ramollit, surnage et laisse déposer les matières plus denses que l'eau dont elle est souillée. On répète parfois cette opération en découpant la gutta-percha en morceaux plus tenus au moyen d'un cylindre pourvu de dents, puis en effectuant une nouvelle séparation dans l'eau tiède.

La gomme ramollie par la chaleur est alors passée à diverses reprises dans un filtre-presse consistant en un cylindre à enveloppe de vapeur, dont le fond, percé de trous, est muni intérieurement de toiles métalliques à mailles de plus en plus fines. Un piston force la gutta-percha à traverser ce filtre et à se débarrasser ainsi de ses dernières impuretés qui restent avec un peu de gomme sur les toiles.

On repasse la gutta-percha jusqu'à ce que la pâte, étirée entre les doigts sous forme de lame mince et regardée par transparence, ne présente plus de grains d'impuretés.

Le produit purifié est ensuite travaillé dans un laminoir dont les cylindres sont chauffés intérieurement à la vapeur. Le passage au laminoir donne de l'homogénéité à la pâte et expulse les bulles d'air et l'humidité qu'elle contient. La gutta est enfin remisée dans des caves où elle durcit. Au moment de l'utiliser, on la fait repasser dans un masticateur afin de lui rendre sa souplesse. Cet appareil consiste en une cuve de fonte chauffée à la vapeur, dans laquelle tournent deux cylindres de laminoir cannelés qui pétrissent la matière.

La gutta-percha n'adhère pas au cuivre; on est obligé d'interposer, entre le conducteur et la gomme, un ciment appelé composition Chatterton et qui contient, en poids, 3 parties de gutta-percha, 1 partie de résine et 1 partie de goudron de bois. Cette application se fait au moment où le conducteur pénètre dans la filière destinée à former le revêtement.

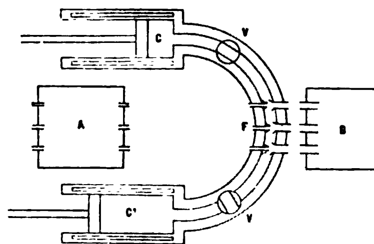



Fig. 315.

Cette filière F est reliée à deux corps de pompe C C' chauffés par une enveloppe de vapeur. Les fils de cuivre traversent les

parois d'un récipient A contenant la composition Chatterton liquéfiée, puis entrent dans la filière par des orifices de même section que les conducteurs et sortent par des orifices ayant la section des conducteurs recouverts.

La filière est mise en relation par des robinets avec l'un ou l'autre des cylindres. Pendant qu'on comprime la gomme dans l'un de ceux-ci, le piston du cylindre voisin revient en arrière pour permettre le rechargement et assurer la continuité de l'opération. Des ouvertures réglables ménagées dans les cylindres permettent de régulariser la pression et d'expulser l'air contenu dans la matière.

Les fils recouverts entrent dans un long baquet d'eau à 12 ou 13°, où la gutta se refroidit et se raffermit. Ils passent alors entre deux cylindres de laminoir garnis de caoutchouc, qui provoquent l'entraînement des conducteurs, puis ils vont s'enrouler sur des bobines.

La couverture de gutta-percha se fait généralement en plusieurs couches alternant avec des couches de Chatterton servant de ciment. On corrige de cette manière les excentricités que peuvent présenter les revêtements successifs. On obtient ceux-ci en faisant repasser le fil dans la filière, dont on modifie convenablement les orifices d'entrée et de sortie.

Lorsque l'*âme*, formée du conducteur recouvert de gutta, est terminée, on l'immerge dans l'eau d'un réservoir cylindrique qu'on peut chauffer à la vapeur à 24° C et on détermine la résistance à l'isolement et la capacité.

La capacité spécifique des guttas médiocres est plus élevée que celle des guttas de bonne qualité. Les premières peuvent manifester, immédiatement après la fabrication, une résistance à l'isolement supérieure à celle des secondes, grâce aux résines qu'elles contiennent; mais, après le fendillement de cette résine, la résistance tombe à une valeur relativement faible.

Les câbles télégraphiques sous-marins doivent être protégés par une armature en fils galvanisés de fer ou d'acier enroulés en spires jointives. Afin d'éviter que le métal ne blesse l'âme, on interpose, sous l'armature, un matelas en chanvre ou en jute tanné, qui agrandit le diamètre d'enroulement du fil protecteur.

On peut aussi faire usage de jute goudronné, mais il faut avoir

soin de ne se servir que de goudron de bois, car le goudron de gaz attaque la gomme par suite de la présence de la créosote.

Les fils de l'armature s'arcboutent sous l'effet des hautes pressions qui règnent dans les mers profondes, et empêchent l'âme d'être écrasée.

Enfin, comme le fer est attaqué par l'eau de mer, particulièrement sur les fonds rocheux riches en sulfures, on recouvre l'armature d'enveloppes de chanvre ou de toile imbibées de composition Clark, formée de 65 parties en poids de poix minérale, de 30 parties de silice et de 5 parties de goudron.

Dans les mers profondes, l'armature est formée de fils de 2 à 3 mm de diamètre. Dans les mers peu profondes ainsi que sur les côtes, où les câbles peuvent être accrochés par les ancres des navires, l'armature est composée de fils de 5 à 6 mm de diamètre.

Les diverses enveloppes de l'âme se placent en faisant passer le conducteur suivant l'axe de plateaux animés d'un mouvement de rotation et portant des bobines sur lesquelles sont enroulés les fils ou rubans protecteurs. En attachant le bout de ceux-ci au câble, la combinaison du mouvement de translation de ce dernier et du mouvement de rotation des bobines produit un enroulement en hélice.

Si les bobines conservent une position invariable par rapport aux plateaux, les fils qui s'en échappent subissent une torsion

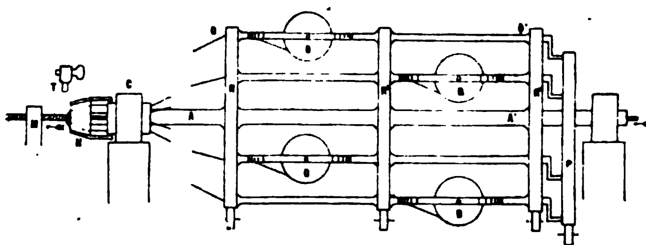


Fig. 316.

pendant le revêtement, à raison d'un tour par révolution des plateaux. Cette torsion, qui ne présente pas d'inconvénient avec les fils de chanvre ou de jute, doit être évitée avec les fils de fer.

Dans ce but, l'arbre creux traversé longitudinalement par le câble porte trois plateaux R, R', R''. Des galets sur lesquels roule

la partie inférieure des plateaux soulagent l'arbre. Les plateaux sont traversés par des axes tels que OO' soutenant les bobines de fil d'acier B. Les extrémités des axes OO' sont coudées vers la droite et supportent un plateau P faisant office de contrepoids. Ce plateau oblige les bobines à se déplacer parallèlement à elles-mêmes et, par suite, à tourner par rapport aux plateaux R, R', R'' de manière à permettre le déroulement du fil sans torsion.

Les fils traversent les axes creux OO', ainsi qu'une buselure engagée dans le coussinet C. Ils pénètrent ensuite dans des rainures héliçoïdales creusées dans un nez N ; enfin ils viennent s'enrouler en hélice autour du câble, sous un courant d'eau sortant du tuyau T et destiné à les refroidir. Les spires sont comprimées dans un toupin M formé de deux mâchoires dont on règle le serrage.

Les divers revêtements sont exécutés par une seule machinerie que traverse le câble. La transmission qui provoque la translation de ce dernier détermine en même temps la rotation des plateaux mobiles, de sorte que, lorsqu'une interruption est nécessaire, tout le mécanisme peut être arrêté d'un coup par un frein puissant à sabot agissant sur cette transmission.

528. — **Paraffines. Résines.** — La paraffine est un des produits de la distillation du pétrole.

Le pétrole, qui, d'après M. Mendeléeff, se forme dans la terre par l'infiltration de l'eau superficielle jusqu'aux roches ignées qui la dissocient et unissent ses éléments avec le carbone que contient le noyau intérieur, est un des corps dont l'industrie tire le plus grand parti. Sa distillation donne d'abord le naphte et d'autres huiles volatiles, puis l'huile employée dans les lampes, ensuite les huiles lourdes qui servent de lubrifiant, enfin la vaseline et la paraffine, et, comme résidu, un produit qui supporte des températures très considérables et qui est presque ininflammable.

Le traitement du pétrole russe ne fournit pas de paraffine, mais bien des huiles lourdes (oléonaphtes) qui constituent des lubrifiants remarquables. Ces huiles sont, en outre, d'excellents isolants, particulièrement pour enfermer les appareils, tels que transformateurs, soumis à des tensions très élevées.

Il est à remarquer que l'air, qui possède une résistance d'isolement pratiquement infinie pour l'électricité de faible tension, est susceptible d'être traversé par l'électricité de haute tension, sous forme d'étincelle ou d'effluve. Le pouvoir diélectrique des huiles et des corps solides est très supérieur à celui de l'air, bien que leur résistance d'isolement, mesurée au moyen des procédés habituels, soit plus faible.

La paraffine présente un isolement très élevé, mais elle est cassante, sujette à se fissurer et à laisser arriver l'humidité en contact avec les conducteurs qu'elle recouvre. Pour atténuer cet inconvénient, on l'associe à des isolants peu coûteux, tels que le jute et le papier, au moyen desquels on garnit les conducteurs et qui sont imprégnés de paraffine à chaud, de manière à chasser l'humidité contenue dans ces matières et à accroître leur pouvoir isolant. Le tout est ensuite revêtu d'une garniture solide, telle qu'un tube de plomb, destinée à empêcher le retour de l'humidité dans les gerçures qui se forment à la longue dans l'enduit.

Dans les mêmes conditions, on peut remplacer la paraffine par la poix ou par le résidu de la distillation des huiles siccatives.

On donne le nom d'ozokérite ou cire fossile à une qualité de paraffine qu'on trouve à l'état natif mélangée à des gangues et autres impuretés, et qui ne se fendille pas comme la paraffine pure.

529. — **Isolants divers.** — Le prix élevé du caoutchouc et les difficultés qu'on rencontre dans l'emploi de la paraffine ont suscité l'invention d'un grand nombre de mélanges isolants dans lesquels ces substances sont associées à des matières résineuses ou bitumineuses. Le but de ces mélanges est d'obtenir, à un prix minime, un corps doué d'un pouvoir isolant et d'une imperméabilité suffisantes, ainsi que d'une résistance convenable à l'action de la chaleur, de l'air et des liquides qui imprègnent le sol. Parmi ces composés nous citerons l'okonite, la kérite, la nigrite et la composition Callender. Beaucoup de ces mélanges sont vulcanisés et nécessitent, pour cette raison, l'étamage du conducteur qu'ils recouvrent.

Les câbles non exposés à l'humidité peuvent être simplement revêtus d'une gaîne de coton ou de jute qu'on imprègne parfois d'un enduit à base de silicates, de manière à assurer son incombustibilité.

## CANALISATIONS DESTINÉES AUX COURANTS INTENSES.

530. — **Câbles aériens.** — Le coût élevé des tranchées et des réfections occasionnées par les canalisations souterraines des villes conduit parfois à employer des conducteurs aériens pour les courants destinés à l'éclairage électrique. Ces conducteurs doivent être isolés lorsqu'ils sont soumis à des tensions électriques élevées ; on emploie ordinairement dans ce but des couvertures de caoutchouc. Afin de pouvoir écarter les supports autant que possible, on suspend le câble électrique à un câble auxiliaire d'acier galvanisé, fixé à des isolateurs. Dans ce but, le câble électrique passe de distance en distance dans des anneaux en porcelaine reliés au câble de support par des fils métalliques.

531. — **Câbles et fils posés à l'intérieur des habitations. Moulures en bois et tubes Bergmann.** — Les conducteurs placés à l'intérieur des habitations peuvent, dans les locaux secs, être simplement recouverts d'une matière textile imprégnée d'une substance non hygroscopique, telle que la paraffine. Dans les locaux humides, les conducteurs doivent être revêtus d'une gaîne imperméable, en caoutchouc généralement.

Lorsque les conducteurs sont hors de portée, ils peuvent être soutenus par des rondelles en porcelaine fixées aux murs En cas contraire, deux méthodes sont employées pour mettre les câbles à l'abri des contacts et des frottements. La plus fréquente consiste à disposer les deux conducteurs formant chaque circuit dans des rainures parallèles creusées dans des lattes appliquées contre les murs. Ces lattes sont recouvertes d'autres lattes moulurées.

Dans le second procédé, imaginé par M. Bergmann, on loge les fils dans des tubes en papier comprimé et imprégné de substances préservatrices. Les tubes sont d'abord posés et raccordés par des manchons métalliques ; les fils sont tirés dans ces tubes et réunis dans des boîtes de jonction en papier comprimé munies de couvercles à bayonnette. Ce système restreint la main-d'œuvre de

placement et permet de remplacer aisément les fils détériorés. Les circuits traversés par des courants faibles sont formés de deux câbles concentriques tirés dans un seul tuyau ; pour les courants intenses, les câbles sont doubles et introduits dans des tuyaux distincts.

532. — **Canalisations souterraines.** — L'établissement des canalisations souterraines présente, dans les grandes villes, des difficultés sérieuses, par suite de l'encombrement du sous-sol par les conduites d'égout, d'eau et de gaz.

On a, à diverses reprises, préconisé l'idée de créer, dans les rues principales, un égout sec ou tunnel propre à recevoir les canalisations d'utilité publique et raccordé avec les maisons par des tuyaux assez larges pour y faire passer les divers branchements. De cette manière, les réparations et les raccords pourraient se faire sans ouvrir des tranchées et sans entraver la circulation.

Un semblable projet ne peut guère être réalisé que par les municipalités qui loueraient les emplacements aux sociétés d'électricité. En l'absence d'un tel réseau d'égouts, les électriciens ont à rechercher un système de canalisations permettant de visiter et de réparer les conducteurs et de faire les branchements des câbles aussi commodément et aussi économiquement que possible. Trois procédés principaux sont en usage.

1° Lorsque les câbles n'ont pas une section trop forte et que leur flexibilité est suffisante, le système suivant, employé depuis longtemps par les administrations télégraphiques, peut être adopté avec avantage.

Une conduite solide en fer, en ciment ou en asphalte est enfouie sous la voirie et interrompue de distance en distance par des puits en maçonnerie ou en fonte d'une capacité suffisante pour permettre à un homme de s'y mouvoir à l'aise. Les conducteurs sont tirés à l'intérieur de la conduite sur une section égale à l'écartement de deux trous d'homme et les divers tronçons sont raccordés entr'eux par des joints. Une telle canalisation présente généralement plusieurs tuyaux distincts destinés à recevoir des circuits différents.

On admet que l'emploi d'une matière isolante pour la confection de la conduite permet de réduire, dans une certaine mesure,

l'épaisseur du diélectrique protégeant les conducteurs. On a préconisé dans cette vue les conduites en asphalte ou les tuyaux en fer revêtus intérieurement de ciment ou d'un enduit vitrifié.

L'eau de condensation ou d'infiltration qui pénètre dans les conduites est recueillie dans des puisards placés au fond des trous d'homme et retirée de temps à autre à l'aide d'une pompe à main. Lorsque le sol est perméable, il suffit de ménager des trous au fond des puisards.

Le système que nous venons d'indiquer est largement employé aux États-Unis, où les distributions à haute tension sont très développées et où les conducteurs ont une section assez faible pour conserver une certaine flexibilité qui permet le tirage des câbles dans les tuyaux. Ce système a l'avantage de se prêter au remplacement des conducteurs et à la pose de conducteurs supplémentaires sans ouvrir des tranchées sur la voie publique. On ne lui reproche qu'un inconvénient : le gaz, provenant des fuites des conduites de gaz voisines et peut-être aussi de la distillation des diélectriques enveloppant des conducteurs traversés par des courants trop intenses, s'accumule parfois dans les trous d'homme et provoque des explosions au contact des flammes nues ou des étincelles électriques. On remédie à ce défaut par une ventilation par compression d'air, qui renouvelle l'atmosphère des conduites et s'oppose à l'infiltration des gaz.

Lorsque, par suite de l'adoption de courants intenses dans les distributions d'électricité, on est amené à recourir à de fortes sections, le système de tirage des câbles dans les conduites oblige à subdiviser les circuits en conducteurs d'une section peu supérieure à 200 mm².

2° Le deuxième procédé consiste à employer des conducteurs couverts d'une gaîne isolante et posés avec leur armature protectrice qui consiste soit en tuyaux de fer, soit en bandes ou en fils de fer enroulés sur le câble isolé.

3° Dans le troisième procédé, les conducteurs sont nus et soutenus sur des isolateurs dans des caniveaux souterrains, interrompus par des trous d'homme où se font les raccordements et où s'accumule l'eau de condensation et d'infiltration qu'on évacue par des pompes ou par des communications avec

les égouts. Ce dernier système, qui peut être employé lorsque la tension de l'électricité n'est pas considérable, a l'avantage d'éliminer les gaînes isolantes qui constituent un élément coûteux et plus sujet à détérioration que les autres parties des canalisations.

Les canalisations électriques se placent sous le milieu des rues, comme les canalisations d'eau et de gaz. Dans ce cas, il faut interrompre la circulation des voitures en tout ou en partie pour effectuer les branchements. Afin d'éviter cet inconvénient, on a eu recours, dans quelques grandes villes, à une canalisation sous chaque trottoir, ce qui accroît considérablement la dépense. Aux traversées des rues les câbles sont alors tirés dans des tuyaux ou disposés dans des tunnels, de manière à permettre les réfections sans gêner la circulation.

## TYPES DE CANALISATIONS A TIRAGE DES CABLES.

533. — **Conduites protectrices.** — D'après un travail de M. Mayer, auquel nous empruntons de nombreux détails sur les canalisations américaines, les compagnies d'éclairage électrique de New-York emploient généralement les tuyaux en fonte pour la protection des câbles. Ces tuyaux, dont la longueur est de 7 m et le diamètre de 5 à 8 cm, sont noyés dans de la maçonnerie. Après avoir préparé la tranchée, on coule au fond un lit de béton sur lequel on dispose une rangée de tubes de fonte qu'on couvre de béton. On alterne de cette manière les tubes et les lits protecteurs, en terminant par une couche de béton plus épaisse sur laquelle on pose, pour plus de sûreté, de fortes planches de sapin destinées à amortir les coups de pioche donnés par les ouvriers chargés de l'ouverture des tranchées dans les rues. Les tuyaux sont parfois goudronnés pour éviter la rouille et l'on veille à ce que leur surface interne ne présente aucune aspérité susceptible de blesser les câbles pendant le tirage. Les tubes successifs sont réunis par des manchons à double filet avec bourrage d'étoupe imprégnée de minium.

On a aussi employé des tubes en fonte présentant une garniture

intérieure en ciment, obtenue en dressant le tube et en y enfonçant provisoirement un tuyau de cuivre qui ménage un vide annulaire dans lequel on coule le ciment.

On s'est servi également, au lieu de conduites métalliques, de blocs d'asphalte soudés les uns aux autres et percés d'une série de canaux longitudinaux dans lesquels on tire les câbles. Le système Dorsett, employé aux États-Unis, et le système Callender-Weber, en usage en Angleterre, sont fondés sur ce principe. On a

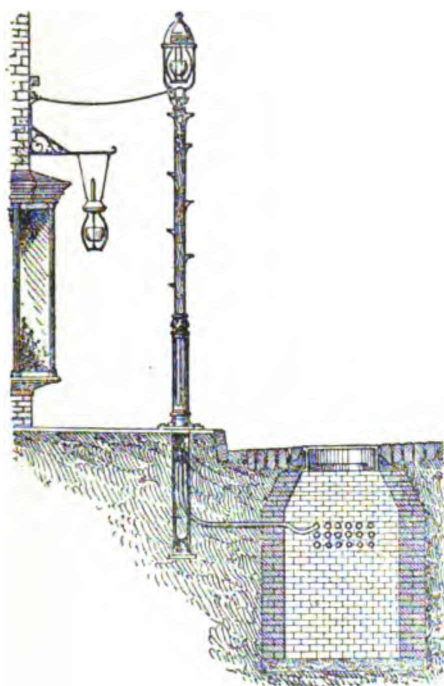


Fig. 317.

enfin essayé les conduites de bois créosoté. Mais le premier système est le plus en usage. Autant que possible, il convient de réserver un tuyau par paire de câbles. La section des tuyaux doit être égale à six fois celle des câbles à tirer.

Le faisceau de tubes dont nous venons de parler est interrompu, à des intervalles variant de 60 m à 100 m, par des trous d'homme par lesquels se font le tirage des câbles et leurs raccordements.

Ces puits, dont la fig. 317 montre un spécimen, ont des dimensions variables avec le nombre des câbles, mais toujours suffisantes pour qu'un homme puisse s'y mouvoir à l'aise. Les parois sont en maçonnerie cimentée pour éviter l'infiltration de l'eau et du gaz. L'orifice du puits est rétréci et possède une double fermeture en fonte afin d'empêcher l'accès des eaux de la chaussée. La fig. 317 montre une série de tubes débouchant dans le trou d'homme, ainsi qu'un branchement vers un réverbère pourvu d'une lampe à arc.

534. — **Câbles.** — Les câbles tirés dans les conduites comprennent une corde flexible en fils de cuivre garnie de couches isolantes et, dans le cas où le diélectrique n'est pas imperméable, couverte d'une enveloppe de plomb destinée à éviter que l'humidité et les liquides corrosifs n'aient accès au conducteur. Le plomb peut être altéré lorsqu'il est soumis à l'action intermittente des infiltrations d'égout ou lorsqu'il est en contact avec des matières créosotées. Dans ces conditions, il se transforme en carbonate et s'effrite. On rend le plomb moins altérable en y alliant 3 pour 100 d'étain, ce qui a l'avantage de communiquer une certaine élasticité aux tuyaux et de les empêcher de se gercer pendant les pliages. Parfois aussi on revêt les tuyaux d'un guipage de coton goudronné ou bitumé.

La gaîne isolante présente des compositions variables. Les meilleures, aux points de vue de l'isolement et de la durée, sont celles qui utilisent le caoutchouc. Autour de la corde de cuivre, on enroule un guipage de coton qui sert de matelas et empêche le métal de percer son enveloppe pendant les pliages, puis viennent des couches successives de caoutchouc naturel, de caoutchouc vulcanisé et de ruban caoutchoucté enroulé en hélice.

Par suite du prix élevé du caoutchouc, on y substitue fréquemment des enveloppes de chanvre, de coton ou de jute imprégnées à chaud de paraffine ou de résine. Dans ce cas, on donne à l'isolant 5 ou 6 mm d'épaisseur pour résister à la tension de 3 000 volts et l'on doit avoir soin d'employer des gaînes de plomb protégeant efficacement l'enveloppe intérieure contre l'humidité.

535. — **Tirage des câbles. Joints.** — Avant d'introduire les câbles dans les tuyaux posés comme on l'a vu au § 533, on doit amener au préalable dans la ligne des tuyaux une corde solide

destinée à effectuer le tirage. Dans ce but, de l'un des trous d'homme on pousse dans la conduite un ruban d'acier qu'on déroule d'une bobine amenée près du puits. L'extrémité du ruban est garnie d'une boule afin d'éviter les arrêts aux joints des tuyaux. Lorsque le ruban a atteint le trou d'homme voisin, on y attache la corde et l'on amène celle-ci dans les tuyaux en retirant le ruban. On fixe ensuite à l'extrémité de la corde un des bouts du câble à poser. Deux ou trois hommes tirent la corde par l'autre extrémité, de manière à introduire le câble dans la conduite. Quand plusieurs câbles doivent être posés dans un tuyau, il convient de les tirer simultanément, car si l'on amène un câble à côté d'autres déjà placés, le frottement des câbles entr'eux occasionne souvent des détériorations aux gaînes protectrices. Lorsqu'on introduit un faisceau de câbles, le frottement contre le tuyau est trop considérable pour que le tirage puisse se faire à la main. On dresse verticalement dans le trou d'homme un gros tambour en bois autour duquel la corde de traction fait quelques tours. L'axe en fer du tambour pivote dans une crapaudine placée au fond du puits et se prolonge en dehors du trou d'homme. Deux hommes tournent ce prolongement à l'aide d'un manège, tandis qu'un ouvrier maintient la corde contre le tambour de manière que l'adhérence soit suffisante pour éviter le glissement de la corde. Il convient de poser des bouts de câble aussi longs que possible sans joint. Dans ce but, le rouleau de câble est tiré tout entier à travers la première section à partir d'un trou d'homme et étendu sur le sol au fur et à mesure qu'il sort du trou d'homme suivant. La partie de câble ainsi développée est tirée alors dans la seconde section et ainsi de suite jusqu'à épuisement du conducteur.

Les câbles étant amenés par ces procédés dans les tuyaux, il faut joindre les tronçons. Ces joints demandent à être faits très soigneusement, car il est arrivé fréquemment que des systèmes de câbles excellents ont donné de mauvais résultats par suite de l'insuffisance des jonctions. On ne doit employer, comme jointeurs, que des ouvriers d'élite, réputés pour le soin qu'ils apportent dans leur travail et auxquels on fait exécuter préalablement un certain nombre de joints d'essai qu'on contrôle au point de vue de l'isolement.

Pour effectuer un joint, on enlève la couverture de plomb sur

6 à 7 cm et la gaîne isolante sur 2,5 cm, à chacun des bouts à réunir. Les deux extrémités dénudées sont introduites dans un manchon en cuivre à rainure et soudées avec la résine. Si l'on doit poser un branchement à l'endroit du joint, on fait usage d'un manchon en forme de T, le conducteur latéral étant introduit dans la branche du T disponible. Le joint soudé, on ramène l'isolant sur le manchon et on enroule tout autour plusieurs couches successives de caoutchouc naturel et de caoutchouc vulcanisé, en interposant entre deux enroulements un dissolvant du caoutchouc, tel que la benzine, de manière à faire adhérer entr'elles les diverses couvertures. Cela fait, on enroule autour des isolants une feuille de plomb qu'on serre sur la couverture de plomb des câbles en faisant, à l'aide de ruban goudronné ou bitumé, des ligatures des deux côtés du joint. L'opération demande une vingtaine de minutes lorsqu'elle est exécutée par un ouvrier exercé.

La Compagnie India Rubber, de Silvertown, effectue les joints d'une façon plus méticuleuse encore. Les bouts dénudés des conducteurs sont empâtés dans la soudure, puis limés en biseaux. Les

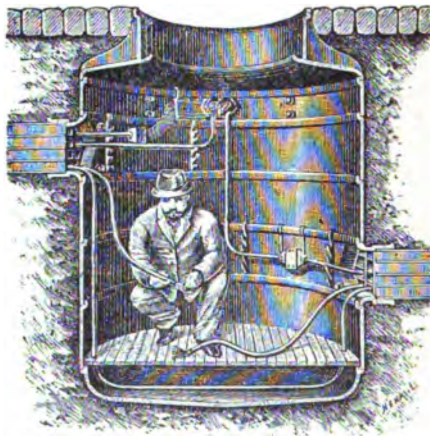


Fig. 318.

deux biseaux sont superposés et soudés. Si les torons ont plus de 18 brins, la corde intérieure est soudée comme ci-dessus, après qu'on a relevé les fils extérieurs qui sont ensuite ramenés sur le noyau, coupés à longueurs convenables et soudés deux à deux.

On a soin d'adoucir la soudure à la lime pour éviter les aspérités qui perceraient le diélectrique. Après avoir taillé les moignons de la gaîne comme un crayon, on enroule au-dessus du joint une couche de caoutchouc naturel et des couches de caoutchouc préparé au soufre, jusqu'à reproduire l'épaisseur de câble normale. On fait adhérer les enveloppes successives entr'elles à l'aide de benzine qu'on chauffe légèrement à la lampe à alcool après l'application. On tend fortement les bandes de caoutchouc pendant l'enroulement pour expulser l'air. On termine par un ruban caoutchoucté. On vulcanise ensuite le joint sur place en l'emprisonnant dans un moule en fonte chauffé par l'intermédiaire d'un bain de soufre, de manière à maintenir la température entre 145 et 150° pendant une demi-heure environ.

La figure 318 représente un modèle de trou d'homme en fonte, du système Johnstone, auquel aboutissent des conduites sectionnées dont nous verrons la description ci-après. Le dessin montre les câbles posés régulièrement le long des parois du trou d'homme, ainsi que le prescrivent les règlements, afin qu'on puisse suivre aisément les communications.

536. — **Conducteurs de distribution.** — La pose des distributeurs, qui se raccordent aux feeders dans les trous d'homme, doit être faite de manière à permettre d'établir avec facilité les branchements. M. Maver nous apprend qu'aux États-Unis les distributeurs sont posés fréquemment dans des conduites noyées dans le béton et placées, au-dessus des conduites principales, à peu de distance du pavé, 50 cm au plus. Ces conduites secondaires sont interrompues, devant chaque maison ou devant le mur mitoyen des maisons voisines, par des regards constitués par des marmites en fonte fermées par une dalle asphaltée de même métal. Les câbles de branchement vers les habitations sont placés dans des tuyaux en fonte aboutissant, d'une part, aux regards, de l'autre, dans les caves des abonnés.

Dans le système Johnstone, représenté par la fig. 319, au lieu d'employer des conduites séparées, on divise une conduite de fonte, formée de deux pièces à emboîtement, par des cloisons entre lesquelles on tire les câbles distributeurs. De distance en distance, la partie supérieure de la conduite porte un orifice fermé par un

couvercle représenté à la gauche de la figure, et auquel se raccorde le tuyau de branchement. Comme les cloisons intérieures sont mobiles, il est facile de faire les raccordements des câbles de branchement avec les distributeurs. Les divers emboîtements extérieurs des conduites Johnstone sont pourvus de joints à rainure remplis de mastic de plombier ; toutefois la multiplicité de ces joints rend douteuse l'étanchéïté du système.

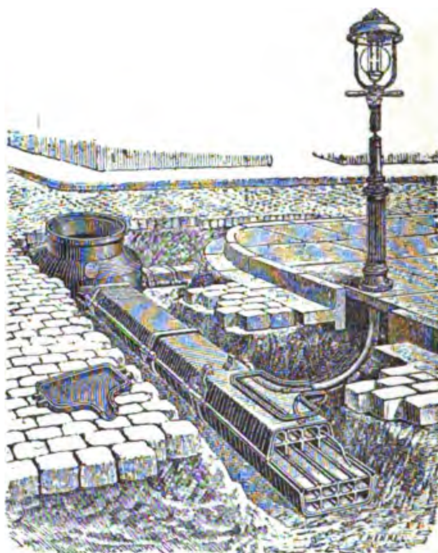


Fig. 319.

Dans beaucoup de cas, les conducteurs de distribution et les feeders sont posés dans une même conduite. Ainsi, au secteur Popp de Paris, les conduites sont formées de tuyaux en fonte rectangulaires à couvercles mobiles, dont les joints sont rendus étanches par l'interposition de bandes de caoutchouc. On divise ces conduites, par des cloisons en bois, en compartiments destinés à recevoir chacun un câble. Les compartiments supérieurs sont réservés aux conducteurs de distribution auxquels on a accès en enlevant un des couvercles, lorsqu'on veut y raccorder des branchements.

## SYSTÈMES DE CONDUCTEURS ÉLECTRIQUES POSÉS AVEC LEURS ARMATURES.

537. — **Canalisations Edison. (1er système).** — Les conducteurs employés dans les premières canalisations Edison sont des barres de cuivre semi-circulaires logées dans des tuyaux en fer, de 6 m de longueur, au milieu desquels elles sont soutenues par des disques percés, disposés de distance en distance. Les vides sont remplis par un mélange coulé à chaud et solide à la température ordinaire. Les conducteurs sont raccordés, de 6 m en 6 m, dans des boîtes de



Fig. 320.

jonction, à l'aide de conducteurs courbes qui permettent l'expansion provenant des variations de la température. On coule le mélange isolant dans ces boîtes de jonction, qui sont formées de deux coquilles dont les rebords sont réunis par des boulons avec interposition de caoutchouc dans le joint. La fig. 320 montre une boîte servant au raccordement d'un circuit dérivé.

538. — **Canalisations Edison (2me système).** — M. Edison a modifié le système précédent pour l'adapter à la distribution par trois conducteurs, § 485.

Trois barres de cuivre rondes, séparées par des cordes de jute, sont introduites dans des tuyaux en fer par longueurs de 6 m. Les interstices sont remplis, avant la pose, par un mélange solide de paraffine, de résine et d'huile coulé à chaud. Les tronçons successifs se raccordent dans des boîtes de jonction en deux pièces, boulonnées sur les extrémités des tuyaux munies de joints à genouillère

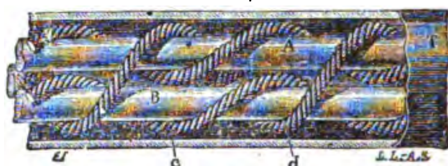


Fig. 321.

assurant une flexibilité suffisante pour permettre de contourner les autres canalisations de la voirie. Les barres de cuivre sont réunies par des bouts de corde souple permettant les dilatations et terminés par des tubes qui s'emboîtent sur les barres auxquelles ils sont fixés par des vis, puis soudés.

Aux branchements, les boîtes de jonction présentent un troisième orifice, dans lequel pénètre le tuyau de raccordement.

De distance en distance, la canalisation principale est interrompue par des trous d'homme en fonte, dans lesquels on relie les feeders aux distributeurs.

Les barres de cuivre employées par M. Edison ont au maximum 18 mm de diamètre. Lorsque ce diamètre est insuffisant pour le courant à transporter, on établit plusieurs conduites parallèles à trois conducteurs.

Dans les feeders, le conducteur neutre a une section égale à la moitié de celle des conducteurs extrêmes, et chaque barre est pourvue d'un fil pilote. Dans les distributeurs, les trois barres ont le même diamètre.

539. — **Câbles Siemens.** — La maison Siemens, de Berlin, fabrique des câbles composés d'une corde de cuivre revêtue d'un guipage de jute imprégné d'une composition isolante à base de bitume et d'huiles lourdes. Un tuyau de plomb est fortement serré sur le câble, afin d'éviter l'introduction de l'humidité. Le tuyau est lui-même recouvert d'un matelas de chanvre imprégné et protégé par

une armature, formée de deux rubans de fer enroulés en sens inverses, sur laquelle est posée une dernière couche de jute à enduit bitumineux qui protège le fer contre la rouille. Les feeders possèdent un fil pilote, comme le montrent les coupes de la fig. 322.

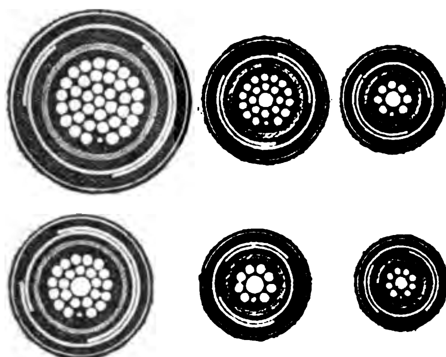


Fig. 322.

Ces câbles sont posés simplement dans le sol; on se contente de recouvrir la terre au-dessus du câble d'une forte toile métallique qui reçoit les coups de pioche en cas d'ouverture d'une tranchée transversale. Les raccords se font dans des boîtes de jonction en deux pièces, fig. 323, présentant des collets cloisonnés dans lesquels les câbles sont fortement serrés pour éviter l'infiltration de l'humidité. Les conducteurs sont réunis par un manchon à vis de serrage. On a soin, le cas échéant, de raccorder séparément les bouts des fils pilotes. Lorsque le couvercle de la boîte est bou-

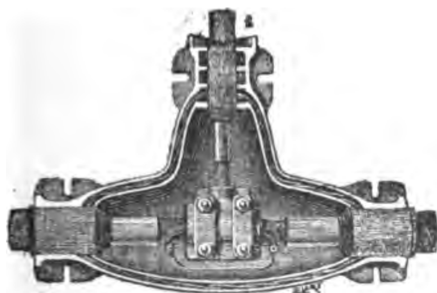


Fig. 323.

lonné, on remplit celle-ci d'huile lourde qu'on verse par un orifice taraudé pratiqué dans le couvercle. On ferme alors l'orifice par un bouchon à vis.

De distance en distance, on intercale dans la canalisation des trous d'homme dans lesquels se font les raccordements principaux. On remarquera que les jonctions s'opèrent sans soudure. On prend seulement la précaution d'étamer les bouts des conducteurs pour éviter l'oxydation.

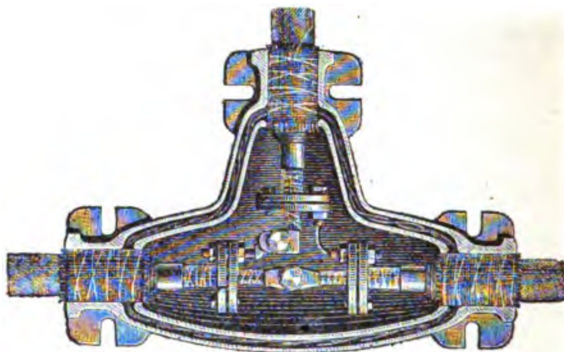


Fig. 324.

La maison Siemens fabrique également des câbles concentriques à deux et à trois conducteurs pour les distributions par courants alternatifs. La boîte de jonction, fig. 324, montre le mode de raccordement de câbles semblables à deux conducteurs. Les cordes centrales sont reliées directement par un manchon. Les bouts des cordes creuses sont relevés et serrés entre des collets réunis entr'eux.

A Rome, les câbles concentriques ont été posés dans des caniveaux en bois remplis de ciment et ont été essayés sous la tension de 5 000 volts.

La maison Siemens fournit des câbles de faible section, du système précédent, pour les montages à l'intérieur des habitations. Elle supprime, dans ce cas, l'armature de fer pour ne conserver que l'enveloppe de plomb.

540. — **Câbles Berthoud, Borel et Cie.** — La maison Berthoud, Borel et Cie, de Cortaillod, fabrique aussi les câbles simples et les

câbles concentriques, fig. 326 et 325. Ces câbles se composent de cordes en cuivre isolées par une couverture de jute imprégnée d'un mélange d'huile de lin oxydée et de résine et garnie de deux tuyaux de plomb moulés à chaud dans une filière spéciale. Les deux

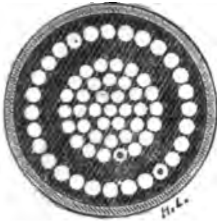


Fig. 325.

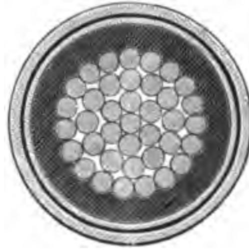


Fig. 326.

couches de plomb sont séparées par du brai destiné à empêcher l'humidité, qui pourrait pénétrer par une fissure de la première couche, de traverser la seconde.

Lorsque les câbles doivent être posés en terre, ils sont protégés, comme les câbles Siemens, par des armatures en bandes de fer revêtues d'un enduit préservateur. Si l'on enfouit directement dans le sol des villes des câbles simplement recouverts de plomb, l'enveloppe est carbonatée au bout de quelques années et s'effrite. De nombreuses expériences témoignent de ce fait qui paraît dû à une action électrolytique ; les tuyaux de plomb utilisés pour les canalisations d'eau, par exemple, se conservent, en effet, fort bien sous terre.

541. — **Conducteurs de Ferranti.** — Les conducteurs, adoptés par M. de Ferranti dans les canalisations pour courants alternatifs de haute tension, comprennent deux tuyaux de cuivre concentriques *b*, *d*, séparés et recouverts par des enveloppes composées de feuilles de papier paraffiné *a*, *c*. Au-dessus de la seconde enveloppe isolante, est un tube de fer servant d'armature protectrice et enduit d'une matière bitumineuse.

Les conducteurs se fabriquent par bouts de 6 mètres. Les enveloppes isolantes se font en donnant au tube à recouvrir un mouvement de rotation servant à provoquer l'enroulement de couches successives de papier imprégné de paraffine fondue. Le

tube de cuivre extérieur et le tube de fer sont comprimés sur le papier par le passage dans une filière.

Pour effectuer les raccordements des bouts de 6 mètres, on donne aux extrémités les profils indiqués dans la fig. 327, de manière qu'elles s'emboîtent et que les conducteurs et l'isolant

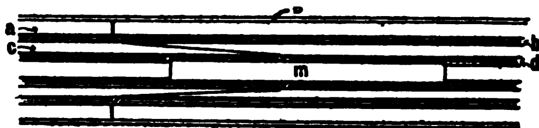



Fig. 327.

intermédiaire, alésés en cônes, se recouvrent exactement. Un cylindre auxiliaire *m* sert à assurer l'alignement des conducteurs réunis. La couche *a* et le tube de fer sont coupés normalement.

Lorsque la canalisation fait un coude, il suffit de ployer les conducteurs dans une machine à cintrer analogue à celle dont on fait usage pour les rails.

## SYSTÈMES DE CONDUCTEURS NUS POSÉS SOUS TERRE.

542. — **Systèmes divers.** — Il y a quelques années, M. Crompton eut l'idée de supprimer la gaîne isolante qui constitue la partie la plus précaire des canalisations et de réaliser, dans des caniveaux souterrains, une sorte de ligne aérienne posée sur isolateurs.

Ce système a depuis été employé de différents côtés dans les distributions à basse tension. La fig. 328 montre l'application qui en a été faite à Paris par la Compagnie Édison. Des caniveaux en béton de ciment, couverts de dalles de même matière, sont placés sous les trottoirs des rues à 15 cm de la surface. Ils ont une section de 37 cm sur 55 cm. Des isolateurs en porcelaine, fixés à des ferrures noyées dans le béton, supportent les cordes de cuivre du système de distribution à trois conducteurs. Ces cordes sont retenues dans des étriers en fonte pénétrant par une queue dans les isolateurs.

Les fils pilotes sont soutenus par des isolateurs spéciaux. Les branchements vers les habitations se font par des fils sous plomb.

Aux traversées de rues, les caniveaux sont arrêtés à des puits raccordés sous la voirie par une galerie dans laquelle un homme peut circuler. Les câbles descendent dans ces galeries par les puits.

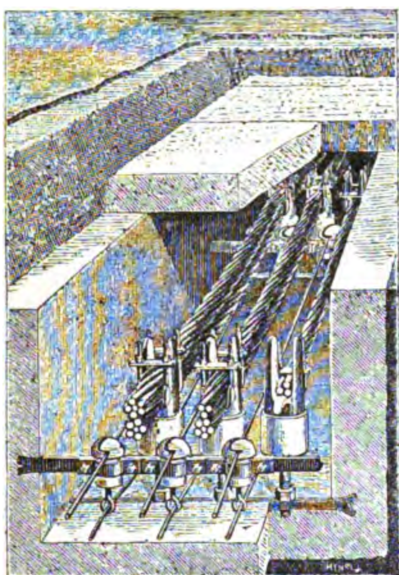


Fig. 328.

L'expérience a montré que les câbles sont exposés à une détérioration rapide par oxydation lorsque les conduites laissent pénétrer l'humidité. De plus, malgré de fréquents raccords à l'égout, les caniveaux laissent, en temps d'orage, s'accumuler de l'eau qui vient en contact avec les conducteurs, ce qui produit des courts-circuits ou, tout au moins, un dégagement gazeux abondant par électrolyse. Il se forme ainsi des mélanges explosifs qu'une étincelle peut faire déflagrer. Actuellement la Compagnie Edison revêt les conducteurs d'un enduit protecteur.

Dans le système de M. Crompton, qui a donné de bons résultats en Angleterre, les caniveaux sont également en béton et ils sont fermés par des voussures dont la distance au dallage des trottoirs varie entre 25 et 60 cm, suivant la position des canalisations existantes. Les caniveaux sont interrompus aux coins des rues et aux branchements principaux par des trous d'homme, en fonte. Ils contiennent des conducteurs se composant de barres plates en cuivre

ayant 2,5 cm de largeur sur 0,6 cm d'épaisseur. Ces barres sont livrées par bouts de 210 m et posées à plat dans des fourchettes portées par des isolateurs en verre placés dans des regards écartés de 15 à 20 m. Ces barres peuvent être poussées dans les caniveaux entre deux regards successifs. On superpose des tronçons semblables jusqu'à ce qu'on ait obtenu la section totale de cuivre désirée. La flexibilité de ces conducteurs leur permet de supporter sans inconvénients les dilatations dues aux échauffements; il se produit simplement une modification dans la flèche entre deux supports. Aux traversées des rues, les caniveaux sont remplacés par des tuyaux en fonte, dans lesquels on pousse les barres soutenues de distance en distance par des isolateurs montés sur des chariots mobiles dans les tuyaux.

Les branchements vers les habitations sont formés par des câbles recouverts de caoutchouc et tirés dans des tuyaux en fonte qui réunissent les immeubles aux regards voisins. Le peu d'eau qui s'infiltre dans les conduites s'écoule vers les regards et est recueillie périodiquement à l'aide de pompes.

A Berlin, la Société générale d'Électricité a également essayé les barres de cuivre nu posées sur des isolateurs dans des caniveaux du système Monier. Ces caniveaux sont rectangulaires et leurs parois, composées de béton de ciment, sont consolidées par une carcasse formée d'une grille de fils d'acier noyés dans l'épaisseur du ciment.



Fig. 329.

Un système qui se rattache aux précédents et qui peut être employé pour les conducteurs intérieurs est celui de M. Fortin-Hermann, fig. 329; le conducteur est enfilé dans de petits cylindres en bois paraffiné et le tout est couvert d'une gaîne de plomb.

## LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES SOUTERRAINES.

543. — **Généralités.** — Les lignes télégraphiques se posent généralement en terre dans les villes, vu la difficulté d'obtenir les auto-

risations nécessaires pour l'emploi de conducteurs aériens. Dans quelques pays, on a fait la dépense considérable de construire des lignes interurbaines souterraines, afin d'éviter les ruptures que les ouragans et le givre causent chaque hiver dans les lignes aériennes.

Les câbles souterrains comprennent plusieurs conducteurs formés de cordes de 3 à 7 fils de cuivre. La subdivision du conducteur a pour but de lui donner de la souplesse et de supprimer les interruptions qu'occasionnerait le bris d'un fil unique. L'isolant généralement employé est la gutta-percha, dont l'imperméabilité est précieuse dans les terrains humides; les courants télégraphiques n'échauffent d'ailleurs jamais l'enveloppe au point de la ramollir. On corde ensemble un nombre d'âmes compris entre 3 et 7, en ayant soin d'interposer dans le câble des cordelettes de jute destinées à remplir les vides.

Les câbles sont protégés dans le sol, soit par des tuyaux en fonte dans lesquels ils sont tirés suivant le procédé décrit au § 535, soit par une armature en fils de fer. Dans le premier cas, on les revêt de couches de fort ruban imprégné de tannin ou de goudron de bois, afin d'éviter qu'ils ne s'éraillent pendant le tirage dans les tuyaux. Dans le second cas, les câbles sont recouverts d'un matelas en jute goudronné ou tanné, puis d'une armature en fils de fer revêtue de jute imprégné d'un enduit préservateur.

544. — **Lignes françaises.** — Le câble adopté par l'Administration française des télégraphes pour les lignes souterraines interurbaines possède 3 conducteurs. L'un d'eux a un diamètre plus fort que les autres. Il sert pour les transmissions à longues distances, les deux conducteurs voisins réunissant les postes télégraphiques intermédiaires. Les sections de ligne qui relient ces postes sont parcourues par des courants différents dont les effets d'induction se neutralisent en tout ou en partie.

Suivant un usage longtemps suivi dans la télégraphie sous-marine, on adopte des poids égaux pour les conducteurs et pour leurs revêtements de gutta-percha.

Le conducteur principal est formé d'un toron de 7 brins de cuivre de 0,75 mm de diamètre, recouvert de 3 couches de gutta-percha, alternant avec 3 couches de composition Chatterton. Le

diamètre total de l'âme est de 6,4 mm. Les 7 brins des conducteurs auxiliaires ont 0,6 mm et le diamètre des âmes mesure 5 mm.

Les trois âmes, câblées avec 3 torons de jute, sont recouvertes d'un guipage de jute tanné, puis d'un ruban de coton goudronné et d'un ruban de coton tanné enroulés en sens inverses.

La résistance des conducteurs est, suivant leur diamètre, de 6,5 et 10 ohms par kilomètre, à 24° C.

Dans tous les cas, la résistance d'isolement, mesurée après 2 minutes d'électrisation et avec une pile donnant environ 100 volts de tension, doit être de 500 mégohms par kilomètre, à 24° C, avec une tolérance de 25 pour 100 d'écart en plus ou en moins. L'isolement maximum est imposé en vue d'écarter les guttas résineuses qui ne conservent pas la résistance spécifique élevée qu'elles présentent immédiatement après la fabrication.

La capacité des âmes ne doit pas dépasser 0,25 microfarad par kilomètre.

Les qualités électriques des câbles sont garanties pendant un an par le constructeur. Durant ce délai les variations ne peuvent pas excéder 10 pour 100.

Les tuyaux en fonte servant à protéger les câbles ont une section variable avec le nombre de ceux-ci. Les tronçons, dont la longueur varie de 2 m à 2,50 m, sont raccordés par des joints à emboîtement, matés au plomb pour assurer l'étanchéïté de la conduite. De 50 m en 50 m, on intercale dans la canalisation un manchon qui peut glisser sur cette dernière, de manière à permettre la surveillance pendant le tirage des câbles et la visite des câbles tirés. Tous les 500 m, la conduite pénètre dans une marmite en fonte pourvue de deux tubulures latérales où s'engagent les tuyaux. C'est par ces chambres que s'opère le tirage.

545. — **Lignes souterraines utilisées en Allemagne et en Belgique.** — Les Administrations télégraphiques allemande et belge font usage de câbles armés de fils de fer, simplement enfouis dans le sol. Voici la spécification d'un de ces câbles qui contiennent 7 conducteurs.

Chaque âme comprend un toron de 7 brins de cuivre de 0,7 mm de diamètre, recouvert de 2 couches de gutta-percha

alternant avec 2 couches de composition Chatterton. Le diamètre de l'âme est de 6 mm.

Les sept âmes sont cordées avec interposition de fils de jute et munies d'un matelas de jute goudronné sur lequel s'applique une armature de 20 fils de fer galvanisé, de 3,75 mm de diamètre. L'armature est elle-même protégée par un guipage de jute goudronné revêtu d'un enduit bitumineux.

Les tranchées destinées à recevoir le câble ont 1 m de profondeur et 0,50 m de largeur. Le câble est déposé dans cette tranchée et recouvert d'abord d'une couche de terre tamisée de 0,10 m, puis de terres de déblai damées par couches de 0,30 m.

Pour la traversée des cours d'eau, on emploie toujours des câbles armés de fils de fer. Le câble est déroulé d'une rive à l'autre au moyen d'un bateau plat dirigé aussi normalement que possible par rapport aux rives.

Le câble reçoit souvent en ces endroits une seconde armature de fils de fer, qui lui permet de résister aux coups de gaffe et à la traction des ancres de bateau.

546. — **Joints des câbles.** — Les joints des câbles doivent être effectués d'une manière très soignée, si l'on veut éviter des défectuosités dont la réparation est toujours coûteuse. Leur exécution ne doit être confiée qu'à des hommes soigneux et exercés.

Ce qui suit peut s'appliquer aussi aux câbles sous-marins dont il sera question ci-après.

Les deux âmes étant dénudées sur une longueur de 2 cm environ, on serre les cordes de cuivre entre deux paires de mâchoires montées sur un chevalet qui sert de siège au jointeur. Les bouts des conducteurs sont préparés à la résine et empâtés de soudure, de manière à former deux fils pleins dont on enlève les aspérités à la lime. Ces fils sont limés en sifflet, appliqués l'un sur l'autre et soudés. Par dessus la jonction on enroule un fil mince de cuivre en spires serrées, qu'on empâte dans de la soudure.

Après avoir de nouveau limé les aspérités, on procède à la réfection de l'enveloppe isolante qui doit comporter autant de couches de gutta qu'il y en a sur le câble normal. Les extrémités de l'enveloppe taillées comme un crayon, pour éliminer les parties altérées par la soudure, sont réchauffées au

dessus d'une lampe à alcool, sans toucher la flamme. Le conducteur ayant été enduit de chatterton également ramolli à la flamme, on ramène sur lui la gutta en la modelant à l'aide des doigts humectés de salive. Cette couche est à son tour revêtue de chatterton que l'on égalise au fer chaud. On applique alors sur le joint une bande de gutta ramollie qu'on pétrit et qu'on soude sur les bords. L'excès de gutta est coupé avec une paire de ciseaux et le tout est poli au fer. On continue de la sorte de façon à reproduire l'enveloppe primitive. Le jointeur chauffe toujours les parties qu'il a touchées avec les doigts, afin de faire disparaître autant que possible toute trace d'humidité.

Lorsque le câble possède une armature en fils de fer, il faut faire l'épissure de celle-ci préalablement relevée sur une longueur convenable. On coupe les fils d'un des bouts à des longueurs décroissantes, les fils correspondants du bout voisin étant sectionnés à des longueurs complémentaires, de manière à ce que les fils ramenés sur le câble reconstituent l'armature normale après que les différents brins ont été soudés deux à deux. Dans les câbles souterrains, on supprime cette dernière soudure en se contentant de serrer autour de l'épissure un fil à ligature.

**547. — Comparaison entre le prix des lignes télégraphiques aériennes et le prix des lignes souterraines à isolement de gutta-percha. Emploi d'autres isolants.** — D'après M. Delarge [1] le coût d'un kilomètre de ligne aérienne le long d'une voie ferrée peut s'évaluer comme suit :

| | | |
|---|---|---|
| 13 poteaux à 9 francs . . . . . . . . . . . | fr. | 117 » |
| 110 kg de fil de fer de 4 mm . . . . . . . . | » | 38,50 |
| Accessoires . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 16 » |
| Salaires . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 18 » |
| Total : | fr. | 189,50 |

[1] F. Delarge, *Notice sur le matériel des lignes télégraphiques belges*, 1868.

La pose d'un fil supplémentaire entraîne les frais suivants :

| | | |
|---|---|---|
| 110 kg de fil de fer de 4 mm . . . . . . . . . | fr. | 38,50 |
| Accessoires . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 16 » |
| Salaires . . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 10 » |
| Total : | fr. | 64,50 |

Il résulte de là qu'une ligne à 7 fils coûte environ 189,50 $+ 6 \times 64{,}50 = 576{,}50$ fr., soit moins de 100 fr. par fil. L'emploi du fil de bronze élève un peu le prix de la ligne à conductibilité égale, mais la durée du bronze est indéfinie, sauf accidents, tandis que le fil de fer galvanisé est hors de service après une quinzaine d'années. De plus, le fil de fer n'est pas tolérable si la ligne doit servir aux correspondances téléphoniques, comme on le verra plus loin.

Le prix de revient d'un kilomètre de ligne souterraine française à 3 câbles (9 conducteurs) s'établit comme suit :

| | | |
|---|---|---|
| Terrassements et pose des tuyaux . . . . . . . | fr. | 1 900 |
| Tuyaux . . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 1 755 |
| Transport et distribution à pied d'œuvre . . . . | » | 320 |
| 3 câbles posés. . . . . . . . . . . . . . . | » | 5 025 |
| Frais de surveillance et réfection des chaussées . . | » | 1 000 |
| Total. . . | fr. | 10 000 |

Le prix des câbles allemands (7 conducteurs) armés, y compris les frais de pose, est estimé à 7 000 fr.

On voit que le coût des lignes souterraines de 7 à 9 conducteurs est environ dix fois supérieur à celui des lignes aériennes, ce qui explique le peu d'extension des premières. Ce n'est guère que dans les artères, où il est absolument indispensable de se ménager une réserve en cas d'interruption des lignes aériennes par les intempéries ou la malveillance, qu'on a recours aux lignes souterraines dont l'emploi n'est imposé que dans les grandes villes. Dans ces dernières, où le nombre des conducteurs tirés dans une même conduite est parfois très considérable, on peut diminuer le prix de revient par conducteur.

On a aussi proposé l'emploi d'isolants moins coûteux que la gutta-percha dont l'usage est d'ailleurs impossible lorsque les câbles sont

voisins de conduites de vapeur, ce qui se présente dans quelques villes. On peut alors faire usage de câbles Berthoud, § 540.

M. Brooks a préconisé l'huile de pétrole comme isolant. Un isolant liquide a l'avantage de remplir les cavités percées par une décharge atmosphérique. Le câble, constitué par des conducteurs recouverts de guipages de coton, est tiré dans une conduite en fer à joints étanches. La conduite est ensuite remplie d'huile. Dans ce but, les points de la canalisation au niveau le plus élevé sont reliés à des réservoirs par lesquels on verse le pétrole. Lorsque le remplissage est terminé, on maintient une certaine pression grâce aux réservoirs, de manière à suppléer aux pertes occasionnées par les fissures des tuyaux. Ce système ne s'est pas répandu par suite des difficultés de pose et d'entretien résultant de ces manipulations.

548. — **Raccordement des lignes aériennes avec les câbles souterrains.** — Ces raccordements se font, pour les câbles importants, dans une cabine où l'on peut installer des appareils d'essai. Pour les câbles courts, on se contente d'établir le raccordement sur une planchette verticale maintenue contre un poteau au moyen d'une console. La planchette porte deux rangées de bornes sur ébonite, l'une des rangées servant à recevoir des fils isolés reliés aux fils aériens, l'autre rattachée aux conducteurs souterrains. Les bornes sont réunies deux à deux par des fils auxiliaires qui sont enlevés dans le cas où l'on veut faire l'essai d'une section de ligne défectueuse.

La planchette et les connexions qu'elle porte sont couvertes d'un chapeau métallique qui vient reposer sur la console et enferme complètement les raccords en les soustrayant à l'humidité.

Il est nécessaire d'intercaler des parafoudres aux points de raccordement pour éviter qu'une décharge atmosphérique suivant la ligne aérienne n'endommage le câble. Dans les cabines, on emploie des parafoudres à pointes ou à feuille de papier, § 478. On fait aussi usage des parafoudres Varley.

Pour les câbles importants, ces divers systèmes sont employés simultanément. On interpose même dans la ligne un fil préservateur mince qui fond lorsque le courant atteint une intensité supérieure à celle du courant de travail.

Lorsque le raccordement se fait sur un poteau, on utilise

parfois, pour arrêter les lignes aériennes, des isolateurs spéciaux qui contiennent un paratonnerre à pointe.

## LIGNES SOUS-MARINES ([1]).

549. — **Généralités**. — L'industrie des câbles sous-marins est une spécialité réservée à quelques grandes usines situées particulièrement en Angleterre, en France et en Italie. Nous nous bornerons à donner une idée générale de la pose de ces câbles.

La route à suivre par un câble sous-marin doit présenter des fonds aussi réguliers que possible. Dans les mers peu profondes et sur les côtes, on évitera les fonds rocheux, balayés par les vagues ou les courants sous-marins, sur lesquels les câbles s'useraient rapidement. On recherche, pour atterrir le câble, des anses peu fréquentées où la ligne ne court pas le risque d'être accrochée par les ancres de navire.

L'âme d'un câble conserve une composition constante sur toute son étendue. Elle est unique dans les longs câbles, attendu que l'induction et la condensation électriques ne permettraient pas, dans ce cas, d'établir plusieurs communications par des âmes juxtaposées. Dans les câbles courts traversant des bras de mer, on peut, au contraire, employer plusieurs âmes contiguës. Tel est le cas des câbles de la Manche et de la mer du Nord, qui ont 4 âmes.

L'isolant usité dans la fabrication des âmes est la gutta-percha, sauf pour les câbles enfouis dans certaines mers tropicales, où la température atteint 30° en quelques endroits, et où il est nécessaire de revêtir les conducteurs de caoutchouc.

L'armature d'un câble varie suivant que celui-ci doit être posé en mer profonde ou en mer peu profonde. Dans le premier cas, l'armature permet au câble de supporter les efforts auxquels celui-ci

---

([1]) Consulter : E. Wünschendorff, *Traité de télégraphie sous-marine*. Paris, Baudry. 1888.

est soumis pendant l'immersion. Elle est formée de fils d'acier galvanisé de 3,5 mm de diamètre. Dans le second cas, le câble peut être accroché par les ancres des navires ou les filets des pêcheurs. Aussi les câbles des mers peu profondes et des côtes exigent une protection exceptionnelle. On peut, ou bien revêtir le câble armé de mer profonde d'une seconde armature en fils d'acier de 6 mm de diamètre, ou adopter une seule armature de fils de fer de ce diamètre.

Le câble est attaqué par différents petits animaux sous-marins qui pénètrent à travers les interstices de l'armature ; on préserve l'âme en la recouvrant d'un ruban de bronze dans les endroits particulièrement exposés.

Voici les conditions électriques exigées d'un câble posé récemment.

La résistance moyenne du conducteur doit être inférieure à 12 ohms, à 24° C, par mille marin (1852 m).

La résistance d'isolement de l'âme doit dépasser 300 mégohms par mille, après 24 heures d'immersion dans l'eau à 24° C. La mesure est faite 14 jours après le recouvrement des conducteurs et après 2 minutes d'électrisation.

**550. — Immersion des câbles.** — L'immersion des grands câbles sous-marins se fait en plusieurs fois par des navires de construction spéciale, possédant de grandes cuves pouvant recevoir des longueurs de câble considérables. Le câble tombe à la mer par l'arrière du navire, après avoir passé par un dynamomètre qui permet de mesurer la tension à bord et un frein qui sert à modifier cette tension en activant ou en ralentissant la chute du câble.

Le dynamomètre comprend deux poulies fixes P, P′, distantes de

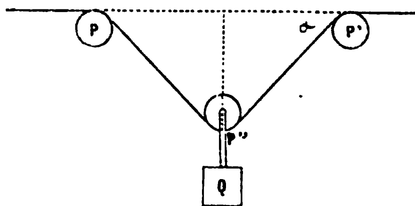



Fig. 330.

$2l$, sur lesquelles passe le câble, et une poulie P″ mobile entre des guides verticaux et servant à appuyer sur le câble un poids Q qui détermine une tension $t$ telle que

$$Q = 2t \sin \alpha = 2t \frac{h}{\sqrt{h^2 + l^2}},$$

d'où

$$t = \frac{Q\sqrt{h^2 + l^2}}{2h}.$$

La tension $t$ peut être lue à chaque instant sur une échelle indiquant la hauteur du poids Q.

Le câble fait deux tours sur un tambour dont on peut enrayer plus ou moins la rotation à l'aide d'un frein Appold à sabots.

Le câble doit être déposé au fond de la mer sans tension. Vu les inégalités du fond, cette condition exige que la longueur de câble immergée soit supérieure à la distance parcourue par le navire.

Soit $u$ la vitesse de filage, $v$ celle du navire, on appelle mou du câble le rapport $m = \frac{u - v}{v}$. Le mou est d'environ 0,10. Il peut être légèrement réduit lorsque le fond de la mer est uni ; il doit être accru, au contraire, quand le fond est accidenté, afin d'empêcher que le câble ne forme chaînette et ne soit fortement tendu entre les arêtes limitant une vallée sous-marine.

Le mou est d'ailleurs nécessaire pour permettre de relever un câble endommagé. Si le câble était posé sans mou, le relèvement entraînerait une tension excessive et la rupture de la ligne.

Si le navire restait immobile pendant l'immersion du câble, celui-ci tomberait verticalement et la tension à bord serait représentée par le poids d'une longueur de câble égale à la profondeur de la mer, diminué de la résistance de frottement opposée par l'eau. Cette résistance est sensiblement proportionnelle à la vitesse de filage $u$. En appelant $p$ le poids du câble dans l'eau, par mètre, $h$ la profondeur et $k$ le coefficient de frottement, la tension à bord serait $t = ph - kuh$.

Si, au contraire, le navire est en marche et si la vitesse de filage est supérieure à celle du vaisseau, le câble tombe suivant une droite dont l'inclinaison est la même que si le navire était immo-

[illegible] en sens inverse. L'angle $\alpha$ de la ligne du [illegible] est réglé par la condition que la composante [illegible] normale à la direction de ce dernier fasse [illegible] résistance transversale de l'eau. La composante de [illegible] au câble est $v \sin \alpha$ ; le frottement transversal [illegible] proportionnel au carré de cette vitesse et peut être [illegible] par unité de longueur du câble, par

$$k' v^2 \sin^2\alpha.$$

[illegible] angle $\alpha$ est défini par l'expression

$$p \cos\alpha = k' v^2 \sin^2\alpha. \qquad (1)$$

[illegible] d'ailleurs

$$t = ph - ku \frac{h}{\sin\alpha} = ph - k \frac{h}{\sin\alpha} v (m + 1). \qquad (2)$$

Ces deux équations permettent de déterminer $\alpha$ et $t$ en fonction de la profondeur de la mer, du mou et de la vitesse du navire. On voit que, pour obtenir un mou déterminé, il faut faire varier la tension, lue au dynamomètre et réglée par le frein, suivant la profondeur de la mer. Le navire connaît d'ailleurs sa position par des observations nautiques et, partant, la profondeur de l'eau déterminée par des sondages préalables.

551. — **Essais effectués pendant l'immersion d'un câble.** — Pendant l'immersion d'un câble le navire reste en communication avec la côte par l'intermédiaire de la ligne posée. A cet effet, l'extrémité atterrie est reliée à un poste d'observation et l'extrémité embarquée avec une cabine d'essais placée sur le pont du navire. A bord, une pile de 100 éléments Daniell est normalement connectée au câble isolé à terre, et l'on observe la résistance d'isolement par la déviation que produit le courant dans un galvanomètre taré.

Toutes les cinq minutes, le poste de terre met le câble en communication avec un condensateur dont l'armature libre est reliée au sol par l'intermédiaire d'un galvanomètre. Le courant de charge perçu dans ce dernier indique que la ligne n'est pas interrompue. L'impulsion observée au galvanomètre du bord donne la même assurance au personnel du navire.

Toutes les quatre heures, le poste de terre relie directement le conducteur au sol, afin de permettre à l'observateur du navire de mesurer sa résistance.

Une brusque diminution de l'isolement indique une perte dans la ligne ou une rupture du câble. On arrête immédiatement le navire pour déterminer la position du défaut par les méthodes qu'on étudiera plus loin et procéder à la réparation.

Si le défaut est à une certaine distance du vaisseau, on relève le câble par l'avant du navire. Dans ce but, le câble fait quelques tours sur un tambour mû à l'aide d'une machine à vapeur. Un frein règle la vitesse de relèvement et un dynamomètre permet de lire la tension. Le câble ramené est lové dans une cuve spéciale. Lorsque le défaut est atteint, on coupe la section défectueuse, on fait une épissure, § 546, et l'on recommence la pose par l'arrière du navire.

Les longs câbles sont posés en plusieurs fois. L'extrémité de chaque tronçon immergé est fixée à une grande bouée en attendant qu'on opère sa jonction au tronçon suivant. Le navire retourne au port d'attache pour prendre celui-ci. Parfois des transports suivent le navire et portent les tronçons successifs, mais ce système entraîne des manipulations dangereuses pour faire passer le câble des transports sur le navire servant à la pose.

552. — **Détériorations des câbles posés. Réparations.** — Les câbles sous-marins peuvent être détériorés par des causes diverses. Dans l'Atlantique, d'énormes bancs de glaces flottantes, venant des pôles, traînent parfois sur le fond de la mer et écrasent les câbles. Les navires les accrochent quelquefois avec leurs ancres et les rompent lorsqu'ils relèvent celles-ci. Des pêcheurs, et particulièrement les pêcheurs de corail, font de même en retirant leurs filets. Mais les grands ennemis des câbles sont de petits animaux sous-marins qui pénètrent entre les fils de l'armature et rongent la gutta-percha.

Lorsqu'une faute importante se déclare dans un câble, on relève sa position par des mesures qui permettent de déterminer la résistance ou la capacité électrique du tronçon compris entre la terre et le défaut, et, partant, la longueur de câble correspondante. Dans la localisation de la faute, il faut tenir compte du mou du câble.

Le navire envoyé pour faire la réparation se transporte vers l'endroit

du défaut en se guidant d'après la position des côtes ou, à défaut, par des mesures nautiques. Il immerge une bouée, puis court en travers de la ligne du câble en traînant un grappin sur le fond. Le câble accroché est ramené à bord et coupé. On détermine quel est le tronçon défectueux et, après avoir fixé le tronçon en bon état à la bouée, on relève le premier jusqu'à ce qu'on soit arrivé à la faute. On coupe le câble en cet endroit, on épisse un bout nouveau et l'on revient à la bouée pour compléter la ligne.

## ISOLEMENT DES CANALISATIONS.

553. — On définit sous le nom de *résistance à l'isolement* d'une canalisation, la résistance comprise entre le conducteur et la terre. Elle est en raison inverse de la longueur de la ligne, car si la canalisation est isolée à l'une de ses extrémités et reliée par l'autre extrémité à une pile dont un des pôles est à la terre, les dérivations de courant à travers les isolateurs ou la gaîne isolante sont échelonnées sur toute la longueur de la ligne et augmentent par suite avec l'étendue de cette dernière. Il s'ensuit que, pour conserver un taux de perte constant, l'isolement par unité de longueur doit croître avec le développement de la canalisation.

La mesure de la résistance à l'isolement s'opère par la méthode de comparaison, décrite au § 238, en observant la déviation occasionnée par le courant de perte dans un galvanomètre gradué, intercalé entre la pile et l'une des extrémités du câble électrique isolé au préalable à l'autre extrémité.

Connaissant la différence de potentiel qui cause le courant, il est facile de déduire la résistance cherchée.

Le courant observé au galvanomètre n'est pas constant pour une différence de potentiel donnée, car au courant de perte s'ajoute le courant de charge du câble, lequel agit comme un condensateur. Ce courant de charge, qui a une valeur élevée au moment de l'application de la pile, va en décroissant; mais avec les diélectriques ordinaires il a encore une intensité appréciable après plusieurs minutes d'électrisation du câble, par suite du phénomène de la charge résiduelle, § 96.

Afin de hâter l'essai, on convient généralement de rapporter la résistance d'isolement à la déviation observée au galvanomètre après une minute d'électrisation, c'est à dire après que la pile a été appliquée au câble pendant une minute.

La tension de la pile d'essai n'est pas indifférente, et il convient d'effectuer l'essai avec un générateur électrique développant une différence de potentiel au moins égale à celle que le câble a à supporter en service courant. Souvent même, on double la tension à l'essai afin de mettre en évidence certains défauts, tels que les soufflures, les gerçures, etc., qui ne se manifestent qu'à la longue avec une tension réduite.

Lorsque la différence de potentiel appliquée normalement atteint plusieurs centaines, voire même plusieurs milliers de volts, il serait coûteux d'établir, à l'usine de fabrication du câble, une pile d'essai fournissant une tension suffisante. Dans ce cas, on peut recourir aux bobines d'induction qui permettent d'obtenir, à peu de frais, des forces électromotrices très considérables.

La résistance d'isolement par kilomètre, exigée des câbles électriques industriels recouverts d'une gaîne isolante, est généralement très élevée. On exige un isolement minimum de plusieurs centaines de mégohms et une résistance, proportionnelle à la tension, d'au moins 25 mégohms par 100 volts, pour les applications utilisant des tensions élevées.

Au premier abord, à part le danger qu'offre le contact des conducteurs mal isolés, on ne voit pas la nécessité d'un isolement aussi considérable, car la perte de puissance correspondante, qui est

$$\frac{\overline{100}^2}{25\,000\,000} = \frac{1}{2\,500} \text{ watt}$$

par kilomètre, pourrait sans inconvénient devenir beaucoup plus grande sans cesser de représenter une très petite fraction de l'énergie perdue par l'effet Joule dans le conducteur.

On a fréquemment exprimé l'opinion qu'un isolement kilométrique d'un mégohm suffirait largement. Mais la difficulté est de maintenir un tel isolement : les substances qui le procurent ne résistent pas en général à l'action du courant et des agents de décomposition. On est obligé de recourir à des corps tels

que le caoutchouc qui, même sous une épaisseur faible, donnent un pouvoir isolant considérable.

Dans les canalisations aériennes et souterraines à conducteurs nus, l'isolement varie beaucoup avec l'état hygrométrique de l'air, par suite de la buée qui se dépose en quantité plus ou moins considérable sur les isolateurs en porcelaine. Dans une atmosphère très-humide, l'isolement peut alors tomber à un mégohm par kilomètre.

A l'usine municipale des Halles de Paris, on a exigé que les câbles, destinés à supporter une tension de 2 400 volts, aient une résistance kilométrique à l'isolement de 1 000 mégohms, valeur qui ne doit pas tomber de plus de 10 pour 100 après la pose des câbles. La valeur spécifiée ci-dessus correspond à près de 42 mégohms par 100 volts.

Les compagnies d'éclairage électrique de New-York exigent 24 mégohms par kilomètre et par 100 volts, au moment de la pose.

Dans une distribution par transformateurs, il n'y a pas grand inconvénient à comprendre dans l'essai les branchements et les circuits primaires de ces appareils et à rapporter la résistance d'isolement trouvée au kilomètre de canalisation. Mais, dans une distribution en dérivation directe, les raccordements intérieurs des abonnés présentent un développement de câbles dont il est difficile d'apprécier l'étendue et qui possède souvent un isolement assez faible, par suite de l'emploi de gaînes en coton peu isolantes. On ne peut, dans un cas semblable, baser la résistance d'isolement sur la longueur réelle de la canalisation.

Afin de tourner la difficulté, M. Picou a proposé de considérer l'étendue de la canalisation comme proportionnelle à l'intensité du courant total circulant dans le réseau. Si l'on admet, en outre, que l'isolement doit croître comme la tension, la résistance d'isolement totale d'un réseau pourra se représenter par

$$r = k\frac{e}{i},$$

$e$ étant la différence de potentiel utilisée dans le réseau et $i$ le courant total fourni à celui-ci. Le coefficient de proportionnalité $k$ reste à déterminer. Il variera nécessairement avec la tension;

divers électriciens pensent qu'il ne doit pas descendre en dessous de $k = 10\,000$.

Les canalisations électriques doivent, autant que possible, faire l'objet d'essais périodiques. Ces essais sont surtout utiles pour les circuits destinés à supporter des tensions élevées, comme c'est le cas dans les distributions indirectes, pour lesquelles on peut essayer séparément les câbles primaires aux moments où les générateurs ne fonctionnent pas.

554. — **Indicateurs de terre.** — Souvent les réseaux électriques sont maintenus constamment en charge, ce qui rend les essais difficiles. Dans ce cas, on adopte une disposition propre à accuser im mdiatement un défaut d'isolement grave dans la canalisation. Soient, par exemple, deux conducteurs, fig. 331, maintenus en

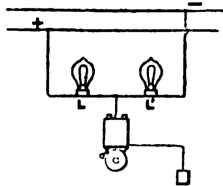



Fig. 331.

relation avec les deux pôles d'un générateur développant une différence de potentiel constante. Deux lampes à incandescence L et L', réglées chacune pour cette tension, ne fournissent, quand elles sont disposées en série, comme l'indique la figure, qu'une lumière rougeâtre de faible intensité. Le fil de jonction des lampes est réuni à la terre par une sonnerie trembleuse. Dès qu'une perte de courant sérieuse se produit dans la canalisation, la sonnerie entre en activité, grâce au courant de perte ; celui-ci traversant l'une des lampes, lui donne un éclat supérieur à celui de la lampe voisine. Dans le cas d'un contact du conducteur supérieur avec la terre, c'est la lampe L dont la lumière devient plus vive.

Souvent, on se contente d'une seule lampe témoin, dont une des bornes est reliée invariablement à la terre et qu'un commutateur permet de raccorder successivement aux deux pôles des générateurs. L'éclat de la lampe varie pendant ces deux opérations si le circuit présente une terre accidentelle.

Si les conducteurs essayés sont alimentés par des courants alter-

natifs de haute tension, on pourra appliquer la méthode précédente en substituant à la lampe la bobine à fil fin d'un transformateur réducteur, dont la bobine à gros fil est fermée sur une lampe ou un voltmètre Cardew.

M. Picou a imaginé un autre dispositif applicable aux circuits à courants alternatifs. Les deux conducteurs de la distribution sont réunis à des condensateurs formés de deux plaques. Les armatures libres communiquent avec un téléphone relié à la terre. Le fil de

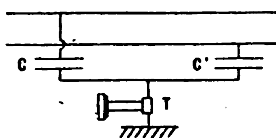


Fig. 332.

jonction est parcouru par des courants alternatifs ; le téléphone l'est également s'il se déclare une terre dans le circuit. L'appareil est à indications continues et le bruit du téléphone peut être rendu assez intense pour être entendu à distance.

555. — **Mesure de la résistance du défaut.** — Pour évaluer la résistance du défaut, M. Picou substitue à la sonnerie de la fig. 331 un galvanoscope, et un rhéostat est intercalé entre le point A et la

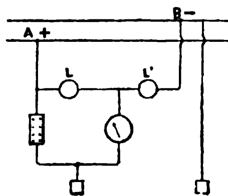


Fig. 333.

terre, fig. 333. On détermine de la sorte une perte artificielle qui contrebalance, sur le galvanoscope, l'influence de la perte réelle due à un contact du conducteur B avec le sol. On fait varier la résistance du rhéostat jusqu'à ce que le galvanoscope revienne au zéro. A ce moment, la résistance insérée est égale à la résistance du défaut, si l'on néglige devant cette dernière la résistance de la canalisation.

**556. — Emploi du voltmètre.** — Une autre méthode propre à déterminer la résistance R du défaut, pendant que la canalisation est en charge, nécessite simplement l'usage d'un voltmètre. Soient V et — V' les potentiels des raccords de la canalisation avec les générateurs.

En reliant le voltmètre de résistance $r$, d'une part à la terre, d'autre part au raccord de potentiel V, l'appareil est traversé par un courant qui, si l'on désigne par $v$ le potentiel du câble à l'endroit du défaut, a pour expression

$$i = \frac{V - v}{r + R}.$$

Le nombre de volts marqué par l'instrument est

$$n = i\,r = \frac{V - v}{r + R}\,r.$$

En raccordant ensuite le voltmètre à l'extrémité — V', on obtient de même

$$n' = -i'\,r = \frac{v - (-V')}{r + R}\,r.$$

Enfin les bornes de l'appareil étant reliées aux deux extrémités V et — V', celui-ci accuse une tension

$$n'' = V + V'.$$

De là on tire

$$R = \frac{n''\,r}{n + n'} - r.$$

**557. — Localisation d'un défaut d'isolement.** — Une fois la perte constatée et sa résistance mesurée, il convient de déterminer le lieu du défaut, afin de faire disparaître celui-ci. Dans les réseaux maintenus sous tension d'une manière permanente et qui présentent un grand nombre de mailles, cette recherche est parfois difficile.

On ne peut qu'isoler successivement les diverses parties du réseau, en interrompant les communications aux boîtes de jonction, jusqu'à ce qu'on ait trouvé la partie défectueuse dans laquelle on localise ensuite le dérangement. Dans une recherche semblable, on s'aide d'une pile dont un pôle est à la terre et dont l'autre pôle

communique avec un galvanomètre ou une sonnerie qu'on relie d'autre part à la section de canalisation essayée. On adopte aussi dans le même but une sonnerie magnéto-électrique qui permet de supprimer la pile. Lorsqu'on fait usage d'un galvanomètre et d'une pile, on peut graduer à l'avance le cadran de l'appareil, de telle sorte que l'aiguille pointe directement la résistance du défaut.

Pour localiser sûrement une terre située soit chez un abonné, soit dans une branche du réseau, on adopte souvent le procédé suivant. L'indicateur de l'usine ayant accusé un défaut sur l'un des conducteurs, B par exemple, fig. 333, on substitue au rhéostat un fil de sûreté qu'on choisit très mince d'abord. Si le fil fond sous l'effet du courant de perte, on le remplace par d'autres de diamètres croissants. Pour un diamètre donné, on n'observe plus la fusion, mais c'est l'un des fils qui protègent la branche défectueuse qui fond, mettant ainsi en évidence la position du défaut. Il convient de procéder à un essai semblable avec discernement, en choisissant une heure convenable de la matinée, pour ne pas interrompre le service.

558. — **Méthode de la boucle.** — Il arrive parfois qu'on ait à localiser une perte à la terre dans une canalisation formée de deux conducteurs bien définis, tels que deux feeders ou deux fils rattachant directement une station génératrice à une station réceptrice. Si l'on peut interrompre le service de ces conducteurs, la méthode dite de la boucle est applicable. Les deux conducteurs sont reliés directement ou bouclés à l'une de leurs extrémités et réunis à l'autre extrémité d'une part par un galvanomètre, d'autre part par un fil divisé, § 236, sur lequel peut glisser un curseur. Celui-ci communique avec une pile dont l'un des pôles est à la terre. On

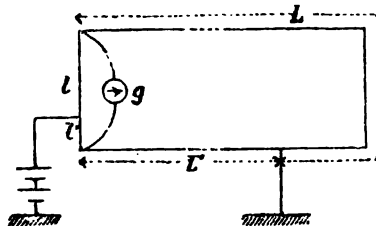



Fig. 334.

déplace le curseur jusqu'à ce que le galvanomètre ne dévie plus. En appelant $l$ et $l'$ les nombres de divisions du fil situées des deux côtés du curseur, L et L' les deux segments du circuit limités par le défaut, on a

$$\frac{L}{L'} = \frac{l}{l'}.$$

On suppose que le conducteur double présente une résistance uniforme, ce qui ne serait pas le cas s'il renfermait des joints mal faits.

559. — **Méthode de l'auteur.** [1] — L'auteur s'est bien trouvé d'une méthode basée sur l'emploi du téléphone et qui permet de localiser très exactement la position d'un défaut.

Supposons d'abord, pour plus de simplicité, qu'il s'agisse de rechercher une perte à la terre dans un conducteur isolé à ses deux extrémités. On relie une de celles-ci à une pile communiquant avec la terre par son pôle libre. Un interrupteur, mû par un mécanisme d'horlogerie, rompt le circuit de la pile à des intervalles rapprochés, de manière à envoyer sur la section de ligne comprise entre la pile et le défaut des courants intermittents. On suit cette section à partir de la pile en présentant, normalement au conducteur et le plus près possible de ce dernier, une bobine droite à noyau de fer doux feuilleté ou formé de fils comme le noyau des petites bobines de Ruhmkorff. L'enroulement de cette bobine est relié à un téléphone que l'expérimentateur tient à l'oreille. Les courants intermittents provoquent dans la bobine des courants induits accusés par le téléphone. Au moment où l'on dépasse la position du défaut, le bruit cesse brusquement.

Cette méthode s'applique aisément à une installation intérieure d'abonné, dont le branchement a été interrompu au préalable et dans laquelle il est facile de transporter la bobine parallèlement à la direction des fils placés sous des moulures ou dissimulés dans les cloisons ou planchers.

---

[1] Bulletin de l'Académie Royale des Sciences de Belgique, 1885.

Dans le cas d'une canalisation souterraine, la bobine accusatrice devra être approchée du conducteur aux trous d'homme ou aux boîtes de jonction, de manière à localiser le défaut entre deux boîtes de jonction successives. Si le conducteur a une armature métallique protectrice, celle-ci s'enlève aisément aux regards intercalés dans la canalisation.

La méthode peut être tentée même dans le cas d'une canalisation en service. Supposons le cas d'un circuit présentant une terre et communiquant avec une dynamo en marche. On reliera l'un des pôles de la dynamo à l'une des armatures d'un grand condensateur, l'autre armature étant unie à la pile d'essai par l'intermédiaire d'un inverseur de courant à mouvements très rapides.

Les courants alternés ainsi produits provoquent dans le condensateur des charges et des décharges qui trouvent leur écoulement par la partie de ligne comprise entre le condensateur et le défaut et se superposent au courant de la machine. Ces courants de charge et de décharge ne traversent pas la dynamo à cause de la forte self-induction de cette dernière. Si donc on suit la partie de ligne indiquée avec la bobine et le téléphone, on découvrira la section défectueuse.

## ESSAIS SPÉCIAUX AUX LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

560. — **Objet des essais.** — Les lignes télégraphiques, spécialement les lignes souterraines et sous-marines, doivent être l'objet d'essais journaliers qui ont pour but, d'une part, de vérifier l'état des lignes, d'autre part, de recueillir les données nécessaires pour localiser aisément la position des dérangements.

Ces essais consistent à déterminer la résistance électrique des lignes, la résistance d'isolement et, dans le cas des câbles, la capacité. Les résultats obtenus sont consignés dans un tableau indiquant la date de l'essai et les circonstances dans lesquelles celui-ci a été fait : pour les lignes aériennes, il convient, par exemple, de noter l'état atmosphérique (brouillard, pluie, neige, etc.), l'humidité ayant une grande influence sur la résistance d'isolement.

Les dérangements des lignes télégraphiques peuvent être rangés dans les trois classes suivantes.

1° *Communication accidentelle de la ligne avec la terre.* Ce dérangement se produit, par exemple, lorsqu'un fil se rompt et que l'un des bouts libres vient en communication avec le sol, ou bien, lorsque le fil est touché par une branche d'arbre, ou encore, dans le cas d'un câble, lorsque l'enveloppe isolante est perforée.

2° *Communication entre deux fils voisins.* Cette communication résulte soit du bris d'un fil aérien dont les tronçons viennent toucher les fils voisins, soit du mélange des fils ballotés par le vent. La liaison peut aussi être établie par un objet intermédiaire.

3° *Interruption de la ligne.* Ce cas ne se présente guère que dans les câbles souterrains ou sous-marins, dont le conducteur peut être rompu, tout en restant isolé par son enveloppe de gutta-percha. Dans les lignes aériennes, un fil, lorsqu'il se brise, tombe à terre ou sur un autre fil, et le dérangement constaté rentre dans l'un des cas énoncés ci-dessus.

Lorsqu'un défaut se produit, le plus simple, dans le cas d'une ligne aérienne, est d'envoyer le long de celle-ci un poseur qui relève la faute et la répare. Cette visite peut se faire très rapidement lorsque la ligne longe un chemin de fer : l'agent, placé dans le fourgon d'un train, suit des yeux le fil qui lui a été indiqué et dont la position relative sur les poteaux reste invariable.

Mais s'il s'agit d'un câble souterrain ou sous-marin, ou encore d'une très longue ligne aérienne, il faut recourir à des essais électriques pour déterminer l'endroit où existe le dérangement. On commence par faire un essai préliminaire permettant de déceler la nature du dérangement. Pour cela, on envoie le courant d'une pile sur la ligne, à travers un galvanomètre. Si la déviation indique une intensité plus grande que celle déduite de la loi d'Ohm (la résistance de la ligne dans les conditions normales étant connue), il y a contact avec la terre en un point intermédiaire ; si la déviation est très faible il y a interruption ; enfin, si le courant est reçu par un fil voisin de celui sur lequel on expérimente, il y a contact entre les deux fils.

Connaissant la nature du dérangement, on procède à la localisation de ce dernier. Considérons d'abord le cas du contact d'un fil

avec la terre ou bien avec un autre fil. On détermine la résistance électrique $x$ de la section de ligne comprise entre le poste où l'on se trouve et le contact. Il est clair que, si $r$ représente la résistance kilométrique du fil, quantité que les essais journaliers font connaître, le rapport $\frac{x}{r}$ mesure, en kilomètres, la distance du poste d'observation au défaut. Dans la recherche de la position d'une faute sur un câble sous-marin, on tiendra éventuellement compte du mou du câble.

561. — **Défaut d'isolement sur une longue ligne.** — *Méthode de Blavier.* Supposons que le diélectrique d'un câble soit percé

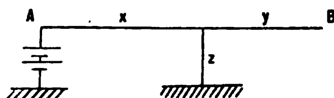



Fig. 335.

en un point. Appelons $x$ et $y$ les résistances électriques des deux tronçons de ligne séparés par ce point et $z$ la résistance du défaut. On connaît, par les essais quotidiens, la résistance de la ligne

$$r_1 = x + y. \qquad (1)$$

En faisant isoler la ligne au bout B et en mesurant la résistance à partir du bout A, à l'aide du pont de Wheatstone par exemple, on obtient

$$r_2 = x + z. \qquad (2)$$

Si l'on répète la mesure en faisant mettre la ligne à la terre en B, la résistance de cette liaison étant négligeable devant celle des conducteurs, on a

$$r_3 = x + \frac{yz}{y+z}. \qquad (3)$$

On déduit de là

$$y = r_1 - r_3 \pm \sqrt{(r_2 - r_3)(r_1 - r_3)}.$$

On peut répéter les essais à l'autre bout de la ligne et prendre des moyennes.

*Précautions à observer.* Les mesures présentent quelques difficultés avec les câbles sous-marins, par suite de la variabilité de la résistance du défaut. Imaginons, par exemple, que ce dernier soit constitué par une fissure dans la gutta-percha, permettant à l'eau de

mer de venir en contact avec le conducteur. La résistance du défaut est due à la mince couche liquide interposée dans la fissure. Si l'on met le câble en communication avec le pôle positif d'une pile, l'oxygène et le chlore dégagés par électrolyse viennent s'unir au cuivre et former un revêtement qui accroît la résistance du défaut. Lorsqu'on relie ensuite le câble avec le pôle négatif, l'hydrogène réduit le dépôt, nettoie le conducteur et diminue la résistance jusqu'au moment où le gaz se dégage sous forme de bulles, ce qui amène des variations dans la résistance du défaut. Dans la méthode précédente, on cherche à saisir le moment où le conducteur du câble est à nu et en communication directe avec l'eau : pour cela, on met le câble en relation alternativement avec les deux pôles d'une pile et l'on observe quand la résistance passe par un minimum.

Les mesures sont encore gênées par des courants telluriques qui proviennent des différences de potentiel aux divers points de la terre. Ces courants présentent, sauf pendant les orages magnétiques, des variations lentes qui permettent de les considérer comme constants pendant la durée d'un essai, lorsque ce dernier est court.

On peut soit les équilibrer à l'aide d'une pile, soit annuler leur effet sur l'aiguille du galvanomètre au moyen d'un aimant voisin de cette aiguille ; mais le plus simple est de considérer comme zéro de la graduation la position de l'aiguille due au courant tellurique.

*Méthode de la boucle.* La méthode de la boucle, § 558, étant indépendante de la résistance du défaut, sera adoptée chaque fois qu'on disposera de deux câbles entre les points extrêmes.

**562. — Contact entre deux lignes.** — Dans le cas du contact entre deux lignes, on isole à l'un des postes l'extrémité de l'une d'entr'elles et l'on met l'extrémité de la seconde à la terre ; à l'autre poste, l'on complète un pont de Wheatstone par les connexions indiquées, fig. 336.

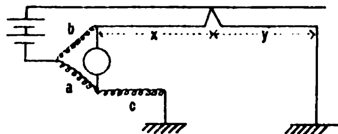



Fig. 336.

L'essai par le pont permet de déterminer le rapport $\frac{x}{y+c}$, tandis que les mesures journalières font connaître $x+y$.

La méthode dont nous venons de parler élimine complètement l'influence de la résistance du contact. Cette résistance variable est reportée sur la diagonale du pont, comme dans la méthode de la boucle, et là sa valeur n'affecte en rien l'équilibre.

563. — **Interruption d'une ligne.** — Lorsque le conducteur d'un câble est rompu et que les deux tronçons restent isolés dans la gaîne de gutta-percha, on détermine la capacité de ceux-ci. Les mesures périodiques faisant connaître la capacité kilométrique, on arrive à établir, avec une grande approximation, l'endroit de la rupture.

# ÉLECTROMOTEURS.

## THÉORIE DES ÉLECTROMOTEURS A COURANT CONTINU.

564. — **Réversibilité des dynamos à courant continu.** — Lorsqu'on relie une dynamo à courant continu à un générateur électrique produisant une différence de potentiel constante, on constate que la dynamo prend un mouvement de rotation qui s'accélère jusqu'à ce que l'effort moteur soit égal au couple résistant. En même temps le courant qui traverse l'appareil diminue graduellement à mesure que la vitesse augmente, ce qui accuse dans la dynamo le développement d'une force contre-électromotrice croissant dans certaines limites avec le travail effectué.

Les machines à courant continu sont donc réversibles; elles peuvent être utilisées aussi bien pour la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique que pour la production de l'effet inverse. Les dynamos employées pour développer du travail mécanique reçoivent le nom d'*électromoteurs*.

Afin de rendre compte du mouvement de l'armature d'un électromoteur, considérons une dynamo à induit annulaire et à excitation en série, fig. 337. Le courant envoyé dans la machine produit dans

les inducteurs un flux de force magnétique traversant l'armature dans la direction N S. Chaque spire de l'induit est sollicitée à se déplacer de manière à embrasser le plus grand flux de force possible

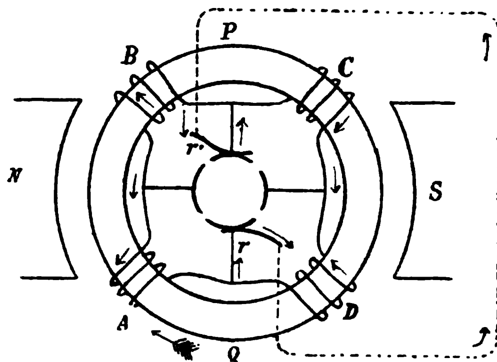



Fig. 337.

par sa face négative, § 131. Les spires situées dans le quadrant A reçoivent le flux par la face négative ; elles tendent à se mouvoir en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, de manière à rendre maximum le flux qui les traverse. Les spires du quadrant D, qui embrassent au contraire les lignes de force par la face positive, tournent dans le même sens afin de provoquer une diminution du flux qui les traverse. En raisonnant de même pour les deux autres quadrants, il est aisé de voir que l'induit prend un mouvement de rotation précisément inverse de celui qu'on doit donner à la machine, fonctionnant comme génératrice, pour lui faire produire le même courant. Ce fait découle directement de l'application de la loi de Lenz, § 165. Il est du reste commun à toutes les dynamos à courant continu, quels que soient le mode d'excitation des inducteurs et le système d'enroulement de l'induit.

565. — **Calage des balais.** — Par suite du changement de sens de la rotation, l'inclinaison des balais du moteur doit être intervertie, afin d'éviter le broutement sur le collecteur des lames ou des fils qui les composent.

Dans les moteurs, comme dans les générateurs, on doit faire varier la position des balais jusqu'à supprimer ou du moins à atténuer,

dans la plus grande mesure possible, les étincelles au collecteur. Dans ce but, les balais doivent être calés, par rapport au mouvement de rotation, en arrière de la ligne équidistante des pôles, de manière que les bobines commutées soient dans un champ magnétique d'intensité suffisante pour renverser le sens du courant et amener celui-ci à l'intensité normale au moment où cesse la mise en court-circuit des sections considérées.

La position occupée par les balais sur le collecteur est sensiblement la même dans un générateur et dans un moteur en série, mais, par suite de l'interversion du sens de la rotation de l'induit, l'angle de calage du moteur est en arrière, au lieu d'être en avant comme dans le générateur.

**566. — Calcul de la puissance et du couple développés par un électromoteur.** — Si l'on désigne par $i$ le courant qui se bifurque en deux parties égales dans l'induit d'une machine bipolaire et par $\mathcal{N}$ le flux magnétique total à travers l'armature, le travail accompli par une spire pendant une révolution autour de l'axe est exprimé par

$$\frac{i}{2} \times 4 \frac{\mathcal{N}}{2} = i \mathcal{N}.$$

S'il y a $n$ fils à la périphérie de l'induit tournant à raison de N tours par seconde, la puissance développée est

$$p = i n \mathrm{N} \mathcal{N}. \qquad (1)$$

Or

$$n \mathrm{N} \mathcal{N} = e, \qquad (2)$$

$e$ représentant la force électromotrice d'induction engendrée par la rotation de l'armature dans le champ des inducteurs, § 341.

La puissance $p$ a donc aussi pour expression

$$p = e\, i. \qquad (3)$$

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, la force électromotrice $e$ est nécessairement de sens opposé à la différence de potentiel appliquée à l'électromoteur. Si l'on désigne celle-ci par E et la résistance de la machine par $r$, on a

$$i = \frac{\mathrm{E} - e}{r}. \qquad (4)$$

Désignons par C le couple développé sur l'arbre du moteur. Le travail par tour est $2\pi$ C et la puissance utile $2\pi$ C N. En négligeant les frottements mécaniques et magnétiques de la machine, ainsi que les courants de Foucault, on peut écrire l'égalité

$$2\pi C N = i n N \mathcal{N}$$

d'où

$$C = \frac{i n \mathcal{N}}{2\pi}. \qquad (5)$$

Si l'on impose des valeurs à deux des cinq quantités C, $i$, E, $e$, N, reliées par les équations (2), (4), (5), les trois autres quantités prennent des valeurs déterminées, car $r$ et $n$ sont des constantes dans une machine donnée et le flux $\mathcal{N}$ est lié invariablement à l'intensité du courant, § 349. Ainsi lorsqu'on règle le couple résistant, par exemple à l'aide d'une charge donnée à un frein de Prony placé sur la poulie du moteur, ainsi que la différence de potentiel E, aussitôt le nombre de tours, l'intensité du courant et la force contre électromotrice acquièrent des valeurs définies.

L'équation (5) montre que, dans l'hypothèse où les effets parasites sont nuls dans une machine en série, le couple moteur est indépendant de la vitesse et ne dépend que de l'intensité du courant. M. M. Deprez, qui a énoncé cette proposition, l'a démontrée en fixant sur l'axe d'un moteur en série un frein de Prony chargé d'un poids déterminé, destiné à équilibrer l'effort moteur. En soumettant la machine à une différence de potentiel croissante, il a observé que le courant augmente jusqu'au moment où le moteur se met en marche, c'est à dire jusqu'au moment où le couple résistant est vaincu par le couple moteur. A partir de cet instant le courant garde une valeur à peu près invariable et les accroissements de la différence de potentiel agissante ne provoquent qu'une accélération de vitesse. Celle-ci prend une valeur correspondant à la puissance dépensée.

**567. — Rendement d'un électromoteur.** — De l'équation (4) on déduit

$$E i = i^2 r + ei.$$

Le premier membre $Ei$ = P représente la puissance électrique dépensée ; $i^2r$ est la perte en chaleur par l'effet Joule et $ei = p$ la

puissance développée par l'appareil, dont les pertes parasites sont supposées négligeables. On appelle *rendement électrique* le rapport

$$\frac{p}{P} = \frac{e}{E} = \frac{E - ir}{E}.$$

Il est facile de voir que l'intensité du courant et la puissance dépensée sont maxima lorsque $e$ est nul, c'est à dire lorsque l'électromoteur est maintenu immobile par le couple résistant. Dans ce cas, le rendement électrique est également nul.

Lorsque le couple résistant opposé à l'électromoteur diminue, la vitesse s'accroît, ainsi que la valeur de $e$. La puissance

$$p = ei = \frac{e(E - e)}{r}$$

augmente jusqu'à une certaine valeur de $e$. Elle est maxima pour $e = \frac{E}{2}$. A ce moment le rendement électrique est 50 pour 100. Eu égard à la faible valeur de ce rendement, un moteur électrique ne doit fonctionner que temporairement sous ce régime de puissance maxima, à la mise en marche par exemple. On ne donne pas d'ailleurs aux conducteurs induits une section suffisante pour qu'ils puissent supporter le courant correspondant à la puissance maxima plus longtemps que quelques instants.

Si la vitesse du moteur continue à croître, la puissance $p$ diminue, mais le rendement augmente jusqu'à une valeur qui, dans l'hypothèse admise, peut s'élever jusqu'à l'unité. A ce moment, on a

$$e = E, \quad i = 0.$$

Ces valeurs correspondent au cas idéal d'un moteur sans frottements ni pertes intérieures d'aucune espèce, auquel on n'oppose aucune résistance. L'appareil se meut alors sans dépense, mais aussi sans production de travail.

Il n'en est pas ainsi dans les électromoteurs réels. Une partie de la puissance théorique $p$ est absorbée par les frottements de l'arbre dans les coussinets et par la résistance de l'air au mouvement de l'induit. Une autre partie est perdue en chaleur par le phénomène d'hystérésis ou frottement magnétique et par les courants de Foucault.

La puissance utilisable $p_u = 2\pi CN$ qu'on peut mesurer au frein sur l'axe de la machine n'est qu'une fraction de la puissance théorique $p$. On désigne sous le nom de *rendement industriel* ou *commercial* de l'électromoteur le rapport de la puissance utile $p_u$ à la puissance électrique dépensée P.

Afin d'apprécier les variations de ces quantités, on mesure, à l'aide d'un frein de Prony ou de tout autre appareil remplissant le même but, le travail utile développé par le moteur lorsqu'on fait varier le couple résistant, en maintenant aux bornes la différence de potentiel pour laquelle la machine est construite. On détermine cette différence, ainsi que l'intensité du courant, au moyen d'un voltmètre et d'un ampèremètre.

On peut alors dresser des diagrammes, en représentant la puissance dépensée $Ei$, la puissance mécanique recueillie $p_u$ et le rendement industriel $\frac{p_u}{Ei}$ par les ordonnées de courbes dont les abscisses figurent les vitesses du moteur. Les courbes de la fig. 338 ont

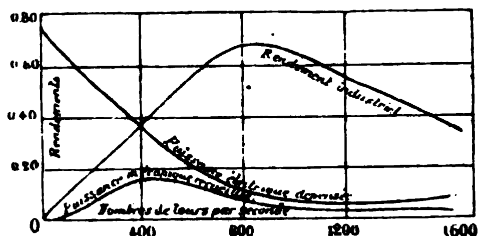


Fig. 338.

été tracées d'après les résultats fournis par un petit moteur électrique. La courbe du rendement montre qu'il convient de faire fonctionner l'appareil en marche normale à l'allure de 800 tours par minute. On calcule la section des conducteurs de l'armature pour le courant correspondant au rendement maximum.

On observe, dans les bonnes machines, que des variations de vitesse et de puissance assez notables ne modifient pas sensiblement le rendement, ce qui est une propriété très avantageuse des moteurs électriques. Ainsi un moteur Schuckert, d'une puissance nominale de 40 chevaux, a donné 0,80 de rendement industriel en produisant 25 chevaux, 0,85 pour 35 chevaux et 0,78 pour 50 chevaux.

**568. — Comparaison des rendements d'une machine fonctionnant comme générateur et comme moteur.** — L'expérience prouve que le rendement industriel d'une dynamo ne change pas notablement, soit qu'on l'emploie comme génératrice ou comme réceptrice, à la condition que la machine ait une puissance dépassant 8 à 10 chevaux.

Si, en effet, deux machines en série identiques tournent à la même vitesse, l'une comme moteur, l'autre comme générateur, on constate que, à angles de calage égaux, la force électromotrice $e$ développée dans l'induit est sensiblement la même dans les deux dynamos. En admettant que des courants identiques $i$ traversent les machines dont la résistance est $r$, les pertes par effet Joule $i^2r$ sont égales. Il en est sensiblement de même pour les pertes de puissance $a$ dues aux frottements, aux courants de Foucault et à l'hystérésis. Les rendements industriels du générateur et du moteur auront respectivement pour expression

$$\frac{ei - i^2 r}{ei + a} \quad \text{et} \quad \frac{ei - a}{ei + i^2 r}$$

ou encore

$$\frac{(e\,i)^2 - (i^2 r)^2}{(ei + a)(ei + i^2 r)} \quad \text{et} \quad \frac{(e\,i)^2 - a^2}{(ei + i^2 r)(ei + a)}.$$

Selon que $a$ est supérieur, égal ou inférieur à $i^2 r$, le rendement du générateur est supérieur, égal ou inférieur à celui du moteur.

Mais, dans les bonnes machines d'une puissance supérieure à 10 chevaux, $i^2 r$ et $a$ ne représentent que le dixième au plus de $ei$ et ne diffèrent jamais beaucoup, en sorte que les deux expressions précédentes sont sensiblement égales. Toutefois, $a$ est généralement inférieur à $i^2 r$, ce qui donne un rendement plus élevé au moteur. Dans le moteur, les courants de Foucault dans le fer sont de sens opposé aux courants de circulation dans le fil induit, ce qui tend à affaiblir les flux transversaux et à diminuer le décalage.

Pour les machines de faible puissance, on observe une supériorité de rendement très marquée en faveur du moteur. Cette différence s'explique par une réaction d'induit plus faible dans les moteurs, ainsi que par les circonstances qui affectent l'amorcement des générateurs. On sait que ceux-ci s'amorcent d'autant plus difficilement que leurs dimensions sont plus faibles. Un moteur,

au contraire, se met toujours en marche, lorsque le couple résistant est proportionné à l'intensité du courant. Il en résulte qu'une dynamo peut avoir un rendement nul comme générateur, tandis qu'elle fonctionne comme moteur.

## DIVERS MODES D'EXCITATION DES MOTEURS A COURANT CONTINU.

569. — **Moteurs excités en série.** — Les distributions d'électricité se faisant à courant constant (distribution en série) ou à tension constante (distribution en dérivation), il importe d'étudier les conditions de fonctionnement des moteurs dans ces deux hypothèses.

Lorsqu'un moteur excité en série est traversé par un courant constant, le flux de force et, par suite, le couple moteur gardent une valeur invariable quelle que soit la vitesse, ainsi qu'il résulte de l'équation

$$C = \frac{i\,n\,\mathfrak{N}}{2\pi}, \quad \S\ 566.$$

Le moteur ne démarre par conséquent que si le couple résistant est inférieur à cette valeur. Si la charge décroît, la vitesse s'accélère jusqu'à ce que les résistances passives compensent la diminution de charge.

Lorsque c'est la différence de potentiel qui est maintenue constante aux bornes du moteur, le courant qui traverse ce dernier atteint une valeur maxima lorsque l'induit est immobile. A ce moment, le flux $\mathfrak{N}$ et le couple moteur ont leurs plus grandes valeurs.

Si le couple résistant ne dépasse pas la grandeur correspondant au courant initial, le moteur se met en marche avec une vitesse croissant jusqu'à ce qu'il y ait équilibre entre l'effort moteur et les résistances. La force contre-électromotrice s'accroît avec la vitesse, ce qui diminue le courant et, par suite, le flux $\mathfrak{N}$ et le couple C. Lorsque les résistances décroissent au point que le moteur n'a plus à vaincre que ses frottements propres, celui-ci prend une vitesse telle que la force contre-électromotrice devient à peu près égale à la différence de potentiel aux bornes. Comme le champ

décroît avec le courant, cette condition n'est réalisable qu'au prix d'une vitesse dépassant notablement la valeur normale.

Dans les très petits moteurs, où les resistances passives sont relativement grandes, la vitesse n'atteint jamais à vide une valeur dangereuse ; mais, dans les grands moteurs, il n'en est pas de même, et il est préférable, lorsque la charge est exposée à décroître au delà d'une certaine limite, de recourir à l'enroulement en dérivation ou à l'enroulement compound.

570. — **Rhéostat de démarrage.** — Lorsqu'un moteur relié à une distribution à tension constante est mis en marche sous une forte charge, le courant peut atteindre une intensité dangereuse pour les conducteurs de la machine, avant que celle-ci ait acquis la vitesse



Fig. 339.

de régime et ait pu développer une force contre-électromotrice s'opposant à la production d'un courant excessif. On prévient cet accident en intercalant à la suite du moteur un rhéostat variable dont on diminue progressivement la résistance à mesure que la vitesse s'accroît. Par économie, on emploie parfois dans ce but un rhéostat à liquide, consistant en deux séries d'électrodes plongeant dans un bain de bicarbonate de soude dissous dans l'eau. La série des anodes en cuivre peut être descendue à l'aide d'une manivelle de façon à diminuer graduellement la résistance du bain. Lorsqu'elle

est à fond de course, des couteaux pénètrent dans des mâchoires et mettent le bain en court-circuit. Au bout d'un certain temps d'emploi, les anodes doivent être renouvelées.

Les rhéostats métalliques sont d'un meilleur usage. On les munit quelquefois d'un électro-aimant disjoncteur qui interrompt le courant lorsque celui-ci devient trop intense par suite d'une surcharge accidentelle du moteur.

571. — **Moteurs excités en dérivation.** — On a vu que si l'on envoie dans une machine en série un courant de même sens que celui qu'elle produit comme génératrice, le sens de rotation de l'induit est interverti. Ce changement de marche ne se produit pas dans une dynamo en dérivation, car, dans ce cas, le sens du flux de force est différent suivant que le courant est dû à l'induit ou à une source extérieure, § 346. Pour un même courant dans l'armature, le sens de rotation d'une machine excitée en dérivation est invariable lorsqu'elle fonctionne comme génératrice ou comme réceptrice. Toutefois, le calage des balais, qui est en avance dans le générateur, vient en arrière dans le moteur.

Les deux systèmes d'excitation présentent des différences notables au point de vue des variations du couple moteur.

Pour discuter les conditions de fonctionnement du moteur en dérivation, il faut joindre aux relations

$$C = \frac{i\, n\, \mathfrak{N}}{2\pi}$$

$$e = n\, N\, \mathfrak{N}$$

$$i = \frac{E - e}{r},$$

où $i$ et $r$ expriment le courant et la résistance de l'induit, l'équation

$$i_d = \frac{E}{d}$$

dans laquelle $i_d$ et $d$ représentent le courant et la résistance des inducteurs, cette dernière étant très supérieure à $r$.

Lorsqu'on introduit dans une distribution en série à courant constant un moteur en dérivation, le courant dérivé dans les inducteurs est d'abord très faible, en sorte que le flux $\mathfrak{N}$ est minime

ainsi que le couple moteur; mais si on laisse tourner l'armature sans charge, la force contre-électromotrice qu'elle engendre accroît rapidement la différence de potentiel aux bornes; le courant dans les inducteurs et, par suite, le couple moteur augmentent et la machine devient capable de surmonter une résistance croissante. Si la charge normale doit être appliquée au moteur quand il est au repos, on introduit, à la suite de l'induit, une résistance additionnelle destinée à accroître l'excitation initiale des inducteurs et qui est enlevée graduellement à mesure que la marche de la machine s'accélère.

Lorsque l'électromoteur est alimenté par une distribution en dérivation, la différence de potentiel E aux bornes de la machine est constante ; le courant $i_d$ reste invariable.

Par suite, le couple moteur est maximum au démarrage et décroît progressivement quand la vitesse augmente. La décroissance est toutefois moins rapide que dans le moteur en série, car dans ce dernier $i$ et $\mathfrak{M}$ diminuent ensemble, tandis que dans le moteur en dérivation, soumis à une tension constante, le flux varie peu. On aura soin d'intercaler à la suite de l'armature un rhéostat capable d'empêcher la production d'un courant excessif dans l'induit lorsque ce dernier démarre à pleine charge.

On voit, d'après ce qui précède, que l'enroulement en dérivation, employé avec une tension constante, est très bien approprié aux cas où la charge est variable. Au démarrage, le moteur donne un couple moteur énergique, et, à mesure que la vitesse s'accélère, le couple diminue ainsi que la dépense de courant, contrairement à ce qui se produit dans les moteurs à air ou à eau, où la dépense de fluide croît avec la vitesse, à moins qu'un régulateur n'intervienne pour modérer l'admission. Si, pour une cause quelconque, l'effort appliqué au moteur change de signe, la machine devient génératrice et son courant contribue à accroître l'énergie fournie à la distribution, le sens du courant restant constant dans les inducteurs.

La régularisation automatique de la consommation d'énergie, dûe à la force contre-électromotrice, fait que la machine électrique en dérivation est admirablement appropriée aux besoins de l'industrie et aux usages domestiques. Aucun autre moteur existant ne présente la même simplicité de mécanisme et de conduite.

La vitesse d'un moteur excité en dérivation et dont les bornes

sont maintenues à une différence de potentiel constante n'est pas notablement affectée par les fluctuations de la charge. En effet, la force contre-électromotrice ayant pour expression

$$e = n\,N\,\mathcal{N} = E - ir,$$

le nombre de tours de l'induit est, par seconde,

$$N = \frac{E - ir}{n\,\mathcal{N}}.$$

On remarque que les deux termes du rapport ci-dessus décroissent lorsque l'intensité du courant dans l'induit augmente, car le flux de force diminue à cause du flux antagoniste dû à l'induit. Le nombre de tours varie donc peu avec le courant, lequel est sensiblement proportionnel au couple moteur.

Il est intéressant de rapprocher cette propriété du moteur en dérivation de celle que présente la même machine lorsqu'elle est employée comme génératrice : mue à une vitesse invariable, elle développe une différence de potentiel à peu près constante aux bornes.

En résumé, dans le moteur en dérivation soumis à une différence de potentiel constante, le couple est maximum au démarrage et diminue progressivement à mesure que la vitesse augmente et que la force contre-électromotrice affaiblit le courant de l'induit.

Une fois la vitesse de régime atteinte, celle-ci varie peu dans les limites de charge de la machine.

572. — **Électromoteurs à excitation composée.** — Si, dans un moteur en dérivation soumis à une différence de potentiel constante, la réduction du flux provoquée par la réaction d'induit est trop faible pour conserver à la vitesse une valeur invariable, il est possible d'arriver à ce résultat en enroulant sur les inducteurs, outre les bobines en dérivation, un certain nombre de spires en série avec l'induit, dans lesquelles le courant est dirigé de manière à affaiblir l'excitation. On obtient de la sorte une action inductrice différentielle, et l'excitation diminue à mesure que le courant augmente.

Pour opérer le démarrage de l'électromoteur, il y a lieu alors de supprimer l'excitation en série à la mise en marche ou mieux

encore de renverser, à ce moment, le courant dans les bobines en série et de ne rétablir le sens normal que lorsque le moteur a pris son allure régulière.

Ce système d'enroulement ne convient pas lorsque les efforts résistants sont très variables, car alors le courant dans l'induit et dans les bobines en série peut atteindre une intensité telle que l'aimantation des inducteurs court le risque d'être intervertie.

Parfois, on maintient les liaisons de l'enroulement compound de telle sorte que les effets des inducteurs en série et des inducteurs en dérivation s'ajoutent en marche normale au lieu de se retrancher comme dans le cas précédent. Une telle combinaison participe des propriétés des moteurs en série et des moteurs en dérivation. Elle est particulièrement appropriée au cas où la source d'électricité est incapable de maintenir une différence de potentiel constante au démarrage; alors l'enroulement en dérivation seul est insuffisant; il convient de renforcer l'excitation initiale grâce à un enroulement en série auxiliaire.

573. — **Caractéristiques mécaniques des moteurs.** — Les propriétés des divers types d'enroulements sont nettement mises en relief au moyen de courbes dont les abscisses représentent les valeurs du couple moteur et les ordonnées les nombres de tours par minute.

Les courbes 1, 2, 3, 4 de la fig. 340, tracées par ce procédé, se

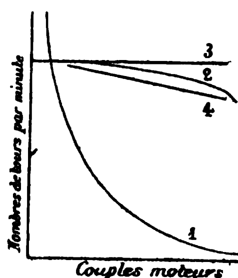



Fig. 340.

rapportent respectivement à des moteurs en série, en dérivation, à deux enroulements différentiels et à deux enroulements concourants, soumis à une différence de potentiel constante.

La courbe 1 montre que la vitesse d'un moteur en série est essentiellement variable avec la charge. Ce système est fort bien approprié aux cas où l'effort au démarrage est considérable. Certains moteurs en série sont capables de donner momentanément un couple initial décuple du couple normal, sans que le courant détériore les conducteurs.

Mais, lorsque la charge tombe à une valeur faible, le moteur s'emporte et atteint parfois des vitesses capables de compromettre sa solidité. Dans un cas semblable, on préfère recourir au moteur excité en dérivation qui, comme le montre la courbe 2, présente une régularité d'allure souvent suffisante pour la pratique. Lorsque la source d'électricité ne peut maintenir une tension initiale constante, on choisira le système des deux enroulements concourants (courbe 4). Si enfin la vitesse doit rester absolument constante, les deux enroulements différentiels fournissent une solution rigoureuse (courbe 3).

On voit par ce qui précède que, sans faire intervenir de régulateurs mécaniques comme dans les moteurs à vapeur ou à eau, on peut, grâce à un choix convenable du mode d'enroulement, satisfaire à l'aide des moteurs électriques aux conditions les plus diverses. Ces appareils se distinguent donc par une grande simplicité dans les organes.

574. — **Systèmes employés pour modifier la puissance et le sens de marche des moteurs.** — Lorsqu'on doit faire varier la puissance ou le sens de marche des moteurs, on a recours à des dispositifs spéciaux. Quand la machine est alimentée par une distribution à tension constante, le moyen le plus employé pour modifier sa puissance consiste à introduire à la suite du moteur une résistance variable permettant de graduer la différence de potentiel appliquée aux bornes de la machine.

Pour changer le sens de la rotation d'un moteur, il faut changer le sens du courant dans l'induit ou dans l'inducteur seulement. Si l'on intervertissait le courant dans les deux organes à la fois, le flux de force et le courant continueraient à réagir dans le même sens qu'auparavant. Cette remarque suggère la possibilité d'alimenter un électromoteur en série par des courants alternatifs, mais certaines difficultés s'opposent, comme on le verra, à la réalisation de cette idée.

Lorsqu'on doit intervertir le sens de marche d'un moteur, il faut prévoir une disposition permettant de modifier convenablement la position et l'inclinaison des balais.

Dans le moteur Reckenzaun, fig. 341, ce changement s'opère à l'aide de deux paires de balais. Les deux balais qu'on voit en

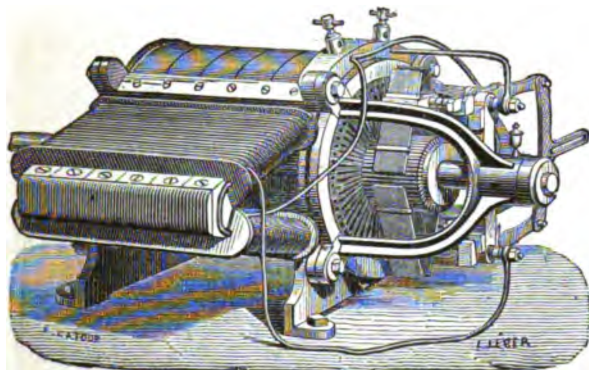


Fig. 341.

avant du collecteur et qui sont destinés à servir alternativement sont fixés ainsi que les deux autres balais, situés à l'arrière du collecteur, à des balanciers qui font partie d'un parallélogramme articulé. En déplaçant le levier figuré à la droite du dessin, on fait pencher les balanciers dans le même sens et l'on amène à volonté l'une ou l'autre des paires de balais en contact avec le collecteur.

Voici, fig. 342, une combinaison analogue employée par M. Immisch. Les balais G oscillant autour d'articulations E sont

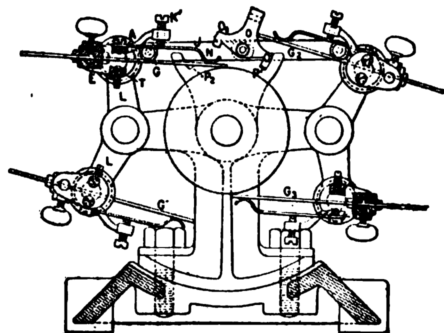



Fig. 342.

appuyés sur le collecteur par des ressorts J. Les deux couples de balais $GG_1$, $G_2G_3$, correspondant aux deux pôles, sont fixés sur des balanciers L. Ces balanciers peuvent être inclinés dans un sens ou dans l'autre à l'aide d'une bielle N, mue par un levier O et dont la course est limitée par des crans d'arrêt $P_1$ $P_2$. Selon que le levier est manœuvré à droite ou à gauche, c'est la paire de balais $GG_3$ ou la paire $G_1G_2$ qui est mise en contact avec le collecteur.

Lorsque les réactions d'induit sont faibles, l'angle de calage est minime et les balais peuvent, aux dépens d'une quantité plus ou moins forte d'étincelles, être calés à la ligne de symétrie dès pôles. On emploie alors des frotteurs massifs qui conservent une position invariable, quels que soient le sens et la vitesse de rotation. Ce système est très usité dans les moteurs des tramways, qu'on soumet à des régimes de courant variables et dans lesquels il est impossible de modifier continuellement l'angle de calage. Les étincelles sont alors un mal presque inévitable et tout ce qu'il est possible de faire est de proportionner les moteurs de manière à en produire le moins possible. On peut toutefois, ainsi que l'a préconisé M. Swinburne, § 393, éviter les étincelles en disposant entre les pôles inducteurs des pôles auxiliaires couvrant les sections de l'induit commutées. [1]

M. Elihu Thomson a employé avec succès des frotteurs constitués par des blocs de charbon aggloméré et durci. Par suite de la résistance de contact offerte par ce corps, les courants sont affaiblis dans les sections passant sous les balais.

Pour changer le sens de la rotation, on intervertit, à l'aide d'un commutateur, le courant dans l'inducteur ou dans l'induit après avoir eu soin de réduire le courant à une valeur très minime par le moyen d'un rhéostat, afin d'éviter la production de fortes étincelles d'extra-courant aux balais.

M. Sprague emploie, pour renverser la marche et graduer la puissance des moteurs, le système suivant. Les inducteurs constituent deux circuits à fil fin séparés et dérivés par rapport aux

---

[1] SWINBURNE, *Theory of armature reactions in dynamos and motors Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 1890.

conducteurs de distribution, fig. 343. L'induit peut être relié en différents points de ces circuits à la manière du galvanomètre dans un pont de Wheatstone. Lorsque les points de liaison sont au milieu, le courant est nul dans l'induit et le moteur ne développe pas d'effort. Si l'on écarte l'un des points de liaison vers l'entrée du

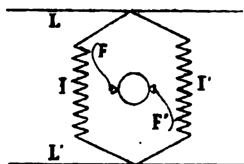



Fig. 343.

courant et l'autre vers la sortie, le moteur se meut avec une vitesse croissante. Si les contacts sont glissés en sens opposé, le moteur prend un mouvement inverse. On peut ainsi obtenir une commande très docile sans courir le risque de provoquer des étincelles dangereuses aux balais. La disposition précédente est appropriée à une distribution en dérivation.

## CONSTRUCTION DES ÉLECTROMOTEURS A COURANT CONTINU.

575. — **Projet d'un moteur électrique.** — Le projet d'un moteur électrique se ramène aisément à celui d'une dynamo. Il y a cependant quelques particularités qui tiennent au mode d'emploi des moteurs. Alors que, dans les dynamos, le poids n'entre en ligne de compte qu'au point de vue du prix, la légèreté est souvent une condition imposée dans les moteurs, ce qui conduit à employer du fer ou de l'acier doux dans la fabrication des inducteurs. Lorsqu'on est dans la nécessité de loger les moteurs dans des espaces restreints, tels que l'intervalle compris entre le sol et la caisse d'une voiture de tramway, on est souvent obligé de donner aux électromoteurs la plus grande compacité possible.

L'induit constituant la partie la plus coûteuse des machines, on cherche, en général, à l'alléger en réduisant ses dimensions. Cependant, comme le rendement d'un moteur est proportionnel à

la force contre-électromotrice qu'il développe et, par suite, à la vitesse linéaire des fils, il ne faut pas trop réduire le diamètre de l'induit, sinon on est obligé d'accroître outre mesure la vitesse angulaire, ce qui nécessite des transmissions multiples pour revenir aux vitesses normales des appareils activés par le moteur.

Les arbres d'atelier tournant ordinairement à des vitesses comprises entre 200 et 300 tours par minute, on cherche à ne pas dépasser aux moteurs la vitesse de 1 000 tours qui permet d'attaquer ces arbres par une seule courroie. Lorsqu'on fait usage de moteurs multipolaires à induits de grandes dimensions, il est possible de commander directement les arbres ou les outils. Mais les moteurs multipolaires de faible puissance sont plus coûteux que les moteurs bipolaires, ce qui limite l'emploi des premiers.

Les conditions initiales d'un projet de moteur sont : la puissance normale et la puissance maxima à développer par l'appareil, la vitesse de régime de l'induit et celle des arbres de transmission.

Il faut indiquer si le moteur est à marche continue ou à marche intermittente, afin de permettre la détermination des limites de courant tolérables pour éviter un échauffement excessif.

Connaissant la puissance en watts P à fournir sur l'arbre moteur, on déduit, par la comparaison avec les moteurs existants, la perte $p$ représentant les frottements mécaniques et magnétiques, ainsi que les courants parasites dans l'armature. En appelant $e$ la force contre-électromotrice et $i$ l'intensité du courant, on a

$$ei = P + p.$$

La valeur de $e$ découle de la tension de la distribution alimentant le moteur. Par suite, l'intensité du courant est donnée par

$$i = \frac{P + p}{e}.$$

Le problème est donc ramené à l'étude d'une dynamo capable de développer une force électromotrice $e$ et un courant $i$ sous une vitesse déterminée.

Dans certains cas, il est important que le moteur puisse produire un effort considérable au moment du démarrage. Soit I le courant

maximum que la machine est capable de supporter pendant quelques instants; le couple initial maximum est

$$C = \frac{n \mathcal{N} I}{2 \pi}.$$

On aura égard à la valeur de I dans la détermination du diamètre du fil de l'armature.

## TRANSFORMATEURS A COURANT CONTINU.

576. — **Systèmes divers.** — Un moteur électrique peut être utilisé, en combinaison avec une dynamo, pour transformer l'énergie électrique, fournie sous forme de courant continu à haute tension, en énergie dont la tension est réduite à une valeur admissible dans les habitations privées. Dans ce but, le premier courant alimente un moteur et ce dernier met en marche une dynamo, dont l'induit fournit la différence de potentiel tolérée.

MM. Laurence, Paris et Scott ont réuni ces deux appareils en un seul. Un induit du genre Pacinotti a ses sections enroulées alternativement à l'aide de gros fil et de fil fin. Ces deux enroulements communiquent avec deux collecteurs situés de part et d'autre de l'armature. L'induit à fil fin est en série avec l'inducteur et reçoit le courant de haute tension, tandis que l'enroulement à gros fil engendre le courant de grande intensité nécessaire pour alimenter leslampes et les autres récepteurs situés chez les particuliers. Cette combinaison a le double avantage de réduire la dépense d'excitation, grâce à l'emploi d'un inducteur commun, et de supprimer à peu près le décalage des balais, attendu que les réactions des deux enroulements sur le champ sont inverses. L'appareil est donc susceptible de tourner sans grande surveillance, puisqu'on n'a pas à toucher aux balais pendant la marche. Par contre, la disposition indiquée a l'inconvénient grave de rapprocher deux circuits à des tensions différentes et d'exposer ceux-ci à des contacts. Le danger est ici bien plus sérieux que dans les transformateurs à courants alternatifs, par suite de la rotation des induits et des extra-cou-

rants auxquels donnent lieu les variations brusques du débit. Pour ces raisons, il paraît préférable de séparer complètement le moteur du générateur et d'employer deux machines distinctes dont les arbres sont unis par un accouplement isolant.

Nous avons vu que MM. Elihu Thomson et Siemens ont employé les moteurs-générateurs dans le but de régulariser les tensions dans une distribution à plusieurs conducteurs. Dans ce cas, les enroulements des induits sont identiques et, comme ils sont soumis à des tensions faibles, le danger signalé plus haut n'existe pas.

## MOTEURS SYNCHRONIQUES.

577. — **Généralités.** — L'invention des moteurs à courants alternatifs est relativement récente et un grand intérêt s'y rattache par suite du développement des distributions d'énergie électrique par les transformateurs.

Des principes divers ont été utilisés dans l'exécution des moteurs à courants alternatifs et ces derniers peuvent se diviser en moteurs à flux inducteur constant ou synchroniques, en moteurs à flux inducteur périodique et en moteurs à flux inducteur tournant ou à courants polyphasés.

Les premiers ne diffèrent pas en principe des alternateurs dont les inducteurs sont alimentés par un courant continu.

Les alternateurs, comme les dynamos continues, sont réversibles, mais, de même que les générateurs à courants alternatifs absorbent une énergie variable pendant la rotation, § 438, lorsque ces machines fonctionnent comme moteurs, sous l'action de courants alternatifs de période convenable, elles développent un couple qui varie périodiquement, ce qui détermine une succession de points morts pendant une révolution. Cette circonstance exige que ces machines, tout au moins les types actuellement connus, soient mises en marche à vide et, en outre, pour les appareils d'une certaine puissance, qu'on leur communique un mouvement initial, comme on le fait pour certains moteurs à gaz.

Considérons une machine magnéto de Siemens A, § 315, et

supposons qu'on envoie le courant qu'elle produit dans une machine semblable B, par l'intermédiaire de collecteurs à bagues non figurés. En vertu du courant indiqué par les flèches, il se développe dans l'induit du récepteur B des pôles qui tendent à entraîner cet organe en lui faisant produire une force électromotrice en opposition avec celle engendrée par A.

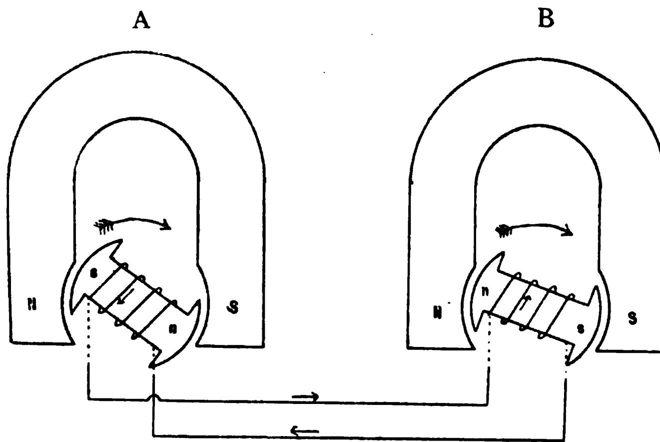



Fig. 344.

Le démarrage de B exige que l'armature de cette machine ne soit pas à l'un des points morts, ce qui arrive lorsque les pôles induits sont en regard des pôles inducteurs. En outre, les frottements et l'inertie de l'induit doivent être assez faibles pour que celui-ci prenne la même vitesse angulaire que l'induit générateur.

Ces conditions sont comparables à celles d'un moteur à vapeur à un cylindre, dont la distribution serait mue par une machine indépendante. Le piston n'obéirait à la force élastique de la vapeur que s'il est dans une position différente des points morts et si le frottement et l'inertie des pièces mobiles lui permettent de suivre immédiatement le jeu périodique des organes de distribution.

Une circonstance favorable au démarrage de l'électromoteur est l'absence de force contre-électromotrice au début, ce qui permet au courant d'atteindre une valeur initiale très élevée. Comme le couple moteur est proportionnel au produit du flux dans l'induit par le

courant qui traverse l'enroulement de ce dernier, il en résulte un effort de démarrage énergique.

Par suite de l'écart entre la phase de la force électromotrice de A et celle du courant, il y a un décalage entre les positions simultanées de B et de A, attendu que la première dépend des phases du courant qui détermine le couple moteur. Ce dernier est pulsatoire et la machine n'acquiert une vitesse de rotation uniforme que grâce à l'inertie des masses en mouvement. On peut diminuer la période de ces pulsations par l'emploi d'inducteurs et d'induits multipolaires.

La puissance que le moteur est susceptible de développer est en rapport avec la puissance électrique $EI \cos \varphi$, § 182, qu'il absorbe. Il convient de réduire, autant que possible, la constante de temps du moteur, afin que l'angle de phase soit minime, sinon on serait conduit à des appareils d'un grand volume et surtout coûteux pour produire un effet utile donné.

Une fois l'induit en marche, on peut appliquer la charge normale. Une surcharge momentanée amène un brusque ralentissement, et, par suite de la diminution de la force contre-électromotrice qui en résulte, un accroissement du courant et de l'effort moteur.

Quand le couple résistant dépasse une certaine limite, la machine tombe hors de phase et s'arrête, les réactions entre l'induit et le champ inducteur ne favorisant plus le mouvement.

Si le moteur marche à vide, il absorbe juste la puissance nécessaire pour vaincre les résistances passives. Lorsque, pour une raison quelconque, la machine est soumise à un effort qui tend à accélérer son mouvement, elle devient aussitôt génératrice et concourt, dans le cas d'une distribution en dérivation, à accroître le courant dans le réseau. Les moteurs synchroniques ont l'avantage d'être, par essence, auto-régulateurs de vitesse.

Le court exposé qui précède fait entrevoir des inconvénients propres aux moteurs synchroniques :

1° Les inducteurs ne peuvent pas, comme ceux des moteurs continus, être alimentés directement par le courant agissant, lequel est alternatif. Cette difficulté a été vaincue par l'emploi d'un redresseur analogue à celui de l'alternateur Ganz, § 431.

On remarquera que le sens de la rotation du moteur ne

dépend que de l'impulsion initiale qu'on lui communique, les réactions entre l'induit et le champ pouvant avoir lieu dans les deux sens. Mais comme, en général, au mouvement de l'alternateur est liée la production du courant d'excitation, il faut avoir égard à la position des balais qui servent à recueillir ce courant.

2° La machine doit être mise en marche à vide, à la main ou autrement, comme les moteurs à gaz, de manière à prendre l'allure correspondant au synchronisme de ses phases avec celles du courant. Les petits moteurs, à masses mobiles légères, démarrent automatiquement lorsqu'ils sont en dehors des points morts.

3° Le couple résistant ne peut excéder certaines limites et il convient d'appliquer la charge avec prudence, puisqu'un ralentissement de la machine occasionne sa mise hors de phase et, par suite, son arrêt. Comme alors la force contre-électromotrice devient nulle, le courant peut atteindre une intensité dangereuse pour la machine. C'est pourquoi il est utile de pourvoir ces moteurs d'un mode d'accouplement qui les débraie automatiquement lorsque la charge devient trop grande et leur permet de continuer à tourner synchroniquement.

**578. — Étude graphique des moteurs synchroniques.** — Afin de montrer les conditions de fonctionnement d'un alternateur soumis à une différence de potentiel efficace constante, nous emploierons la méthode graphique préconisée par M. Blakesley [1] et qui est le développement de celle exposée au § 181.

Si le couple qui s'oppose à son mouvement n'est pas trop considérable, l'alternateur prend une vitesse angulaire sous laquelle il développe une force contre-électromotrice de même période que la différence de potentiel agissante.

Représentons le maximum de cette dernière par AB, fig. 345, et par AC le maximum de la force contre-électromotrice, l'angle BAC figurant le retard des phases des deux quantités. Si l'on admet que les deux droites tournent autour du point A en sens

---

[1] Blakesley, *Alternating Currents of Electricity*, London, 1889. Fleming, *The Alternate current Transformer*, London, 1889.

inverse du mouvement des aiguilles d'une montre, leurs projections sur une direction choisie arbitrairement représentent, à un instant quelconque, les valeurs momentanées des forces électromotrices agissant dans l'alternateur. La force électromotrice résultante est la somme algébrique de ces projections. Dans le cas de la figure, comme celles-ci ont des sens contraires, la valeur momentanée de la résultante est, la plupart du temps, égale à la différence des projections considérées. Il n'est pas difficile de voir que cette différence est, à chaque instant, égale à la projection de la diagonale, passant par A, du parallélogramme tracé sur AB et AC ; on en conclut que cette diagonale représente la force électromotrice résultante maxima. Cette résultante peut aussi être représentée en

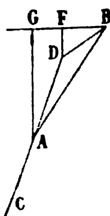



Fig. 345.

grandeur et en direction par DB, si l'on prend DA = AC. On voit que lorsqu'on se donne les grandeurs et les directions relatives des forces électromotrices maxima agissant dans un circuit, la force électromotrice maxima résultante est obtenue par un procédé identique à celui qu'on emploie pour composer des forces de directions différentes. Mais, à son tour, la force électromotrice résultante DB doit être combinée avec la force électromotrice de self-induction de l'alternateur, pour donner la force électromotrice effective dont la phase coïncide avec celle du courant, § 181.

Désignons par $\mathcal{L}$ le coefficient de self-induction, supposé constant, de la machine, par $r$ la résistance de celle-ci et par T la période. L'angle de retard $\varphi$ de la force électromotrice effective sur DB a pour tangente $\frac{2\pi}{T}\frac{\mathcal{L}}{r}$. Portons cet angle suivant DBG et abaissons sur BG les perpendiculaires DF et AG. La longueur FD repré-

sente la force électromotrice de self-induction et FB la force électromotrice effective dont la phase coïncide avec celle du courant et qui est égale à celui-ci multiplié par la résistance $r$.

Cela étant, considérons BG comme la direction de l'espace sur laquelle se projettent les forces électromotrices dans leur révolution autour du point A. Dans la position considérée, GB est la différence de potentiel momentanément agissante et FG la force contre-électromotrice.

Les puissances dues à ces diverses forces électromotrices se représentent simplement. Si l'on désigne par E la force électromotrice résultante maxima, par I le courant maximum, on a vu que la puissance moyenne est exprimée par

$$P = \frac{EI}{2}\cos\varphi.$$

Mais

$$E = DB, \qquad I = \frac{FB}{r}, \quad \cos\varphi = \frac{FB}{DB};$$

d'où

$$P = \frac{FB}{2r} \times FB.$$

Cette puissance est transformée en chaleur dans le circuit de l'alternateur.

On obtiendra de même la puissance P′ due à la différence de potentiel agissante AB, en multipliant la moitié du courant maximum $\frac{FB}{2r}$ par la projection GB

$$P' = \frac{FB}{2r} \times GB,$$

attendu que l'angle GBA est le retard du courant sur la différence de potentiel agissante.

Il faut remarquer que cette expression est indépendante de la direction de la base sur laquelle on projette les divers vecteurs.

En effet, on démontre en géométrie que la moyenne des produits des projections, sur une direction quelconque, de deux droites $a$ et $b$ faisant entr'elles un angle $\alpha$ est égale à $\frac{ab}{2}\cos\alpha$.

La puissance due à la force contre-électromotrice est

$$P'' = \frac{FB}{2} \times FG.$$

Cette dernière est la puissance motrice de l'alternateur.

La puissance dépensée P′ est évidemment égale à la somme de la puissance recueillie P″ et de la puissance calorifique P.

Le rendement électrique de l'alternateur a pour expression

$$\eta = \frac{P''}{P'} = \frac{FG}{GB}.$$

Il est aisé de voir sur la figure que, si la force électromotrice de self-induction FD augmente, l'angle FBD croît et finit par atteindre une valeur pour laquelle la direction AG se confond avec la direction AD. Alors le travail recueilli est nul.

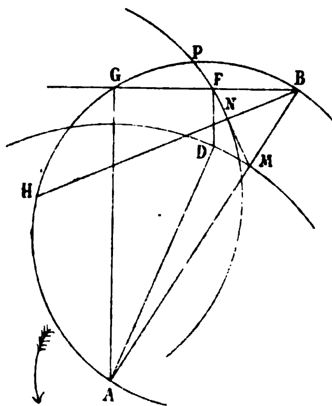



Fig. 346.

Nous avons admis, jusqu'à présent, que l'électromoteur suit la marche synchronique, en présentant un angle de phase égal à BAC par rapport à la différence de potentiel agissante. Il est intéressant de rechercher les conditions d'équilibre dynamique et, pour cela, de voir ce que devient le mouvement si l'on accroît ou si l'on diminue brusquement l'effort résistant, ce qui entraîne un retard ou une accélération momentanée de l'électromoteur. Nous supposerons

que la marche de ce dernier reste synchronique et que, par conséquent, la force contre-électromotrice ne change pas, non plus que la différence de potentiel agissante. Cela revient à admettre, dans le cas d'une surcharge, que le moteur s'arrête un instant, puis reprend aussitôt sa marche normale.

Si l'angle de phase BAC varie, le point C se meut sur une circonférence de centre A. Comme l'angle DBF $= \varphi$ est invariable, le point F se déplace sur une courbe telle que le rapport de FB à DB est constant et égal à cos $\varphi$.

Pour trouver le lieu du point F, de B on tire la droite BH, telle que ABH $= \varphi$, et on trace la circonférence de diamètre AB. De M on abaisse la normale MN sur B H. Puis, de H comme centre, on décrit une circonférence de rayon HN, laquelle est le lieu cherché.

On a, en effet,

$$\frac{DB}{FB} = \frac{BM}{BN} = \frac{MA}{NH} = \frac{1}{\cos \varphi}.$$

Voyons ce qui advient si l'angle de phase BAC est modifié, par exemple par un accroissement momentané du couple résistant, ce qui amène un léger retard de AC, c'est à dire une diminution de BAD.

Le point D avance vers la droite, ainsi que F. Par suite, GB et FG augmentent et, comme ces longueurs sont respectivement proportionnelles à la puissance dépensée et à la puissance recueillie, on voit que la première croît de manière à rétablir l'angle de phase primitif.

Si, au contraire, le moteur s'accélère, par suite d'une décharge momentanée, l'angle BAD augmente, GB et FG décroissent, et la puissance dépensée diminue de manière à conserver l'allure normale de l'électromoteur.

On voit que, dans les deux cas, la puissance due à la source d'électricité varie de manière à ramener le synchronisme du moteur. L'angle de phase BAC considéré correspond donc à une position d'équilibre stable, comme tous ceux pour lesquels F ne dépasse pas l'intersection P, car pour ce point le travail recueilli devient nul. On trouverait de même un certain nombre de positions de D, à la droite de AB, pour lesquelles l'équilibre dynamique est stable.

579. — **Moteur Ganz.** — Le moteur Ganz ne diffère pas en principe de l'alternateur du même constructeur, § 431. C'est une machine à courants alternatifs, dont les inducteurs sont excités par des courants redressés préalablement réduits à une tension convenable par un transformateur. La fig. 347 montre le schéma de la liaison entre la ligne et les inducteurs. Comme on l'a vu au § 431, les lames du commutateur d'ordre pair sont reliées à l'une des extrémités du circuit inducteur, l'autre extrémité étant réunie aux lames d'ordre impair. En marche normale, le circuit secondaire du transformateur T est connecté à deux paires de balais 1 2, 3 4, les deux balais d'une même paire étant écartés d'un intervalle égal à la 1/2 ou au 1/4 de la largeur d'une lame. De cette manière, les inducteurs sont mis en court-circuit au moment où se produit l'interversion du courant, ce qui évite les étincelles d'extra-courant qui jailliraient d'une façon très intense, s'il n'y avait qu'un balai de chaque côté. Toutefois, cette disposition ne

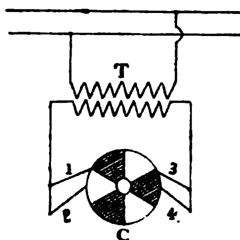



Fig. 347.

peut être adoptée à la mise en train du moteur, car, par suite de la paresse magnétique des noyaux, les inducteurs ne s'exciteraient pas suffisamment pour donner un couple initial capable de provoquer la marche synchronique. C'est pourquoi un arrangement spécial permet de soulever un des balais de chaque paire à la mise en train. Il en résulte qu'alors il se produit des gerbes d'étincelles qui atteignent parfois 5 cm de longueur dans les grands moteurs. Une fois le moteur en marche, on laisse retomber les balais soulevés et les étincelles sont réduites à une proportion minime. M. Ganz a réalisé une disposition automatique qui effectue la manœuvre des balais mobiles. Dans ce but, ceux-ci sont commandés par un régulateur à force centrifuge placé sur l'arbre et

ils ne s'appliquent contre le collecteur que lorsque les boules sont suffisamment écartées.

De nombreuses expériences ont été exécutées sur des moteurs Ganz de diverses puissances par une commission nommée par la ville de Francfort. Un moteur de 25 chevaux nominaux a fourni des rendements industriels variant de 82 à 88 pour 100, pour des charges allant de 15 à 35 chevaux effectifs. Ce moteur doit être mis en marche à la main, sans charge. Une fois la vitesse de régime atteinte, ce qui demande moins d'une minute, il est possible d'appliquer brusquement un effort correspondant à 26 chevaux, sans que le moteur s'arrête. Après cela, la charge est susceptible de recevoir des accroissements progressifs, jusqu'à ce que la puissance fournie soit égale à 40 chevaux, soit 60 pour 100 de plus que la puissance nominale. Les étincelles atteignent jusque 5 cm lors de la mise en train. Ce fait est considéré comme sans importance relativement à l'usure du collecteur qui ne perd chaque fois que 17 milligrammes de cuivre, en moyenne.

La commission a comparé ce moteur à des moteurs à courant continu de même puissance ; elle n'a pas trouvé grande différence quant au rendement, mais le moteur à courant continu a l'avantage de se mettre spontanément en marche et de supporter des surcharges momentanément très élevées sans cesser de fonctionner. Ces dernières qualités sont particulièrement prisées dans la traction des tramways.

Les petits moteurs alternatifs de Ganz, qui ne demandent qu'un effort initial très faible pour la marche à vide, se mettent en train spontanément sous l'effet du courant lorsque l'induit est dans une position favorable, ce qui arrive deux fois sur trois avec les moteurs de $^1/_5$ de cheval essayés par la commission.

On est libre de réduire la tension du courant qui alimente l'induit à l'aide d'un transformateur ou de conserver la tension de distribution, ce qui ne paraît pas devoir présenter d'inconvénient lorsque le moteur est placé sous la surveillance d'un mécanicien spécial.

**580. — Système Mordey.** — M. Mordey recommande d'exciter l'électromoteur alternatif par une dynamo continue fixée sur le même axe, comme l'indique la fig. 348.

Pendant la marche normale, la dynamo excitatrice, en même temps qu'elle alimente les inducteurs, charge quelques couples

secondaires qui, au moment de la mise en train, font fonction de générateurs pour exciter les inducteurs de la machine alternative.

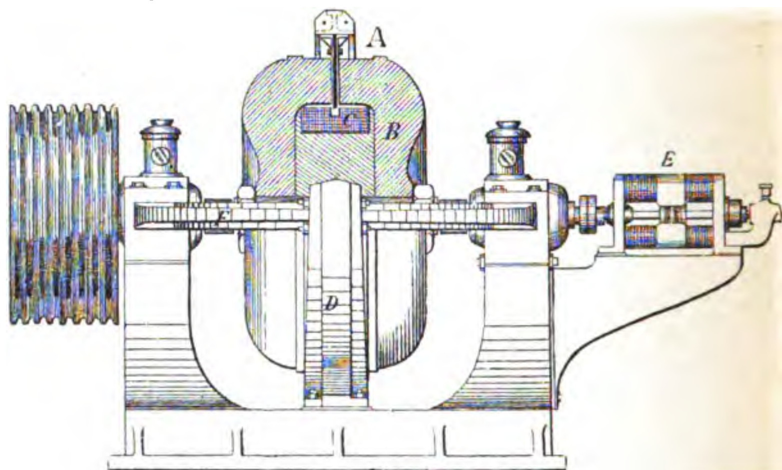



Fig. 348.

## MOTEURS A FLUX INDUCTEUR PÉRIODIQUE.

581. — **Moteurs à inducteurs feuilletés.** — Nous avons déjà eu l'occasion de faire remarquer qu'un moteur continu, excité en série, persiste dans son mouvement lorsque le sens du courant change à la fois dans l'inducteur et dans l'induit. Rien ne s'oppose donc, en principe, à ce qu'on alimente un appareil semblable par des courants alternatifs, surtout si, comme dans les machines Rechnewski, les inducteurs sont feuilletés pour éviter les courants de Foucault. Toutefois, diverses objections se présentent immédiatement à l'esprit. La self-induction considérable d'un tel système oppose une résistance apparente excessive à la force électromotrice alternative ; de là résultent un affaiblissement très marqué du courant et un retard de phase qui réduisent à une valeur minime la puissance moyenne que la machine est capable d'absorber et, partant, le travail qu'elle est susceptible de produire. Mais, ce qui est plus grave, les variations périodiques du courant amènent des réactions de self-induction qui doivent nécessairement occasionner au collecteur des étincelles fort nuisibles à la conservation de ce dernier. La division des inducteurs n'empêche pas des pertes sérieuses dues au phénomène d'hystérésis. Ces objections tombent

quand il s'agit d'une machine sans fer, telle que celle qui constitue le compteur Thomson, § 515. On remarquera qu'un système semblable est susceptible de tourner à toutes vitesses et de se mettre en marche spontanément sous l'action du courant.

582. — **Systèmes Mordey et Leblanc.** — MM. Mordey et Leblanc ont breveté des dispositions permettant de redresser les courants alternatifs, en vue de les utiliser pour mouvoir des machines à courant continu. Dans ce but, ces dernières entraînent un commutateur redresseur analogue à celui qu'on emploie dans la machine Ganz, § 579. Le courant continu ainsi obtenu présente toutefois des ondulations qui donnent lieu à des réactions de self-induction et à des étincelles aux balais.

583. — **Système Elihu Thomson.** — On arrive à supprimer en grande partie ces étincelles, grâce au procédé suivant suggéré par M. Elihu Thomson. Considérons une machine bipolaire à inducteurs feuilletés et supposons que les balais soient décalés d'un angle considérable, de 45° par exemple. Les inducteurs et l'induit étant en série, la machine est mise en train par un courant alternatif. On retire alors l'induit du circuit et l'on relie ses balais par un fil direct. La machine continue à tourner sous l'influence des réactions qui s'exercent entre le flux périodique dû aux inducteurs et les courants induits qu'il produit dans l'armature. Les variations du flux font, en effet, naître dans les sections de l'induit une force électromotrice, dont la phase retarde de 90° et qui, grâce à la position dissymétrique des balais, donne lieu à un courant résultant dans le fil qui relie ceux-ci. Par suite de la self-induction, le courant induit retarde sur la force électromotrice qui le produit; il en résulte, entre la phase du flux et la phase du courant, un écart compris entre 90° et 180°. Or, comme la réaction entre le flux et le courant est proportionnelle à la moyenne des produits de ces deux quantités et que ce produit a ici une valeur finie, l'induit tend à persister dans son mouvement de rotation aussi longtemps que les inducteurs sont traversés par les courants alternatifs. Le système constitue une sorte de transformateur dont le circuit induit est mobile et obéit aux efforts pulsatoires dus à l'action du courant inducteur.

Disons toutefois que si ce dispositif arrive à diminuer les étin-

celles, il n'évite pas l'inconvénient résultant de la forte self-induction des inducteurs traversés par des courants alternatifs. Le retard de phase qui provient de cette self-induction réduit la puissance utilisable et oblige d'employer des générateurs de grandes dimensions pour arriver à un effet utile relativement restreint.

584. — **Système Stanley et Kelly.** — Dans un moteur à inducteurs feuilletés, § 581, alimenté par des courants alternatifs, on ne peut pas adopter l'excitation en dérivation, car la différence de phase qui se produirait entre le courant inducteur et le courant induit nuirait aux réactions de ces courants en provoquant un affaiblissement du couple moteur.

MM. Stanley et Kelly sont cependant arrivés à combiner un moteur en dérivation en prenant les précautions suivantes :

1° Le nombre des spires inductrices n'est que le 0,1 environ du nombre correspondant dans un moteur à courant continu. En outre, un condensateur mis en série avec les inducteurs et jouant le rôle d'une self-induction négative réduit l'impédance de ceux-ci.

2° Pour combattre la self-induction de l'induit, on encastre dans les pièces polaires des conducteurs parallèles aux spires induites et constituant des circuits fermés grâce à des fils de liaison placés entre les pôles opposés. Ces circuits fermés doivent avoir leurs plans parallèles aux lignes de force produites par les pôles, afin que les variations du flux inducteur n'y déterminent pas de courants induits. Ils remplissent par rapport à l'armature le rôle du secondaire d'un transformateur, lequel a pour effet, comme on l'a vu au § 460, de réduire la self-induction du primaire. Il faut que les circuits auxiliaires soient très peu résistants, pour ne pas entraîner une dépense d'énergie notable par effet Joule.

## MOTEURS A FLUX INDUCTEUR TOURNANT.

585. — **Propriété générale.** — Le couple développé par un moteur synchronique varie nécessairement d'une manière périodique, attendu que la courbe représentant la puissance électrique absorbée par la machine accuse des variations. Mais, par la combinaison de plusieurs courants alternatifs de phases différentes, on peut arriver à transmettre au moteur une puissance électrique constante.

Considérons $n$ circuits de mêmes résistance et self-induction,

parcourus par des courants dus à des forces électromotrices représentées par

$$e = \mathrm{E} \sin\left(at + k\frac{2\pi}{n}\right),$$

expression dans laquelle on donne successivement à $k$ les valeurs $0, 1, 2, \ldots, n-1$.

Les courants traversant ces circuits seront de la forme

$$i = \mathrm{I} \sin\left(at + k\frac{2\pi}{n} - \varphi\right)$$

et la puissance fournie à l'un des circuits aura pour mesure

$$ei = \mathrm{EI} \sin\left(at + k\frac{2\pi}{n}\right) \sin\left(at + k\frac{2\pi}{n} - \varphi\right).$$

Par une transformation simple, cette formule devient

$$ei = \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos\varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \cos\left(2at + 2k\frac{2\pi}{n} - \varphi\right).$$

La puissance totale absorbée par les $n$ circuits sera

$$\frac{n\,\mathrm{EI}}{2} \cos\varphi - \frac{\mathrm{EI}}{2} \sum_{k=0}^{k=n-1} \cos\left(2at + 2k\frac{2\pi}{n} - \varphi\right).$$

Or, en vertu d'une relation trigonométrique connue, le second terme est nul; il s'ensuit que la puissance totale transmise est constante.

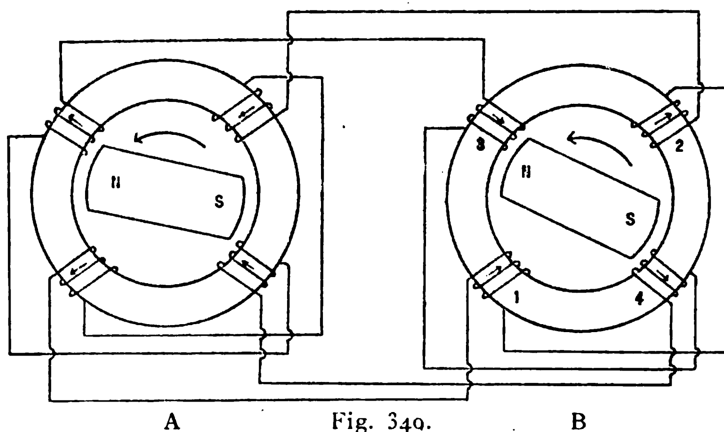
Cette propriété des courants polyphasés montre la possibilité de transformer sans précautions spéciales un courant continu en courants polyphasés et inversement, alors que la transformation d'un courant alternatif simple en courant continu, par l'intermédiaire d'un alternateur et d'une dynamo, exige l'emploi d'un moteur suppléant par des réactions d'inertie aux variations de la puissance électrique.

On conclut aussi de ce qui précède la possibilité de la transformation des courants diphasés ou triphasés en courants à six phases ou plus.

On a vu, au § 192, que la combinaison des forces magnétomotrices dues à deux courants alternatifs différant d'un quart de phase engendre un champ magnétique tournant uniforme, ainsi qu'on peut s'en convaincre par la composition à l'aide du parallélogramme des forces. Si les variations des courants n'étaient pas sinusoïdales, il y aurait des pulsations dans l'intensité du champ

résultant et le couple exercé sur un disque mobile dans le champ cesserait d'être constant. On peut arriver à réduire les pulsations par la combinaison d'un plus grand nombre de courants. De là l'emploi des courants triphasés.

**586. — Moteur théorique.** — Considérons deux anneaux A et B portant chacun 4 bobines reliées comme l'indique la fig. 349, 4 fils de ligne servant à réunir les paires de bobines semblablement




A Fig. 349. B

placées sur les deux anneaux. Si l'on fait tourner dans l'anneau A un aimant N S, on produit dans les bobines deux courants différant d'un quart de phase. Ces courants déterminent dans l'anneau B un champ magnétique tournant.

Si l'on examine le sens des courants, on voit aisément qu'ils produisent des pôles tournant dans le sens de la grande flèche. Dans l'anneau A, la direction moyenne du flux créé par le courant induit tourne en restant normale à l'aimant inducteur. Le flux tournant de B est parallèle à celui de A, mais dirigé en sens inverse par suite du sens contraire des courants. Si l'on suppose un aimant N S mobile à l'intérieur de B, la réaction des pôles tournants tendra à lui communiquer un mouvement synchronique avec celui de l'aimant A et de même sens.

On remarquera qu'il n'y a pas, dans un moteur semblable, de points morts comme ceux que nous avons rencontrés dans un moteur synchronique monophasé. En effet, au lieu d'un flux pulsatoire de direction constante, il y a ici deux flux pulsatoires qui

se composent et donnent un flux tournant. De la même manière que, dans une machine locomotive, le décalage des manivelles supprime les points morts, lorsque deux des bobines de l'électromoteur exercent une action nulle, les deux autres bobines sont, par rapport à l'aimant mobile, dans les conditions du maximum d'action. Les pôles tournants entraînent l'aimant quelle que soit sa position initiale.

Par suite des remarques exposées au paragraphe précédent ainsi qu'au § 448, le flux tournant sera vraisemblablement pulsatoire, ce qui occasionnera une variation périodique du couple moteur agissant sur l'aimant.

587. — **Moteurs à induit mobile et à induit fixe. Systèmes de M. Dobrowolski et de M. Brown.** — Supposons qu'on remplace, dans le moteur B, l'aimant par un cylindre conducteur dont l'axe mobile coïncide avec celui de l'anneau et admettons, pour simplifier le raisonnement, que le flux tournant conserve une valeur constante. Par suite des courants induits dans le cylindre, ce dernier tend à être entraîné dans le sens de la rotation du champ, § 191. On obtient de la sorte un électromoteur d'une simplicité remarquable. Toutefois, cette disposition n'est applicable qu'à de très petits appareils. Le couple moteur étant dû à la réaction des courants induits sur le champ, il convient, dans les machines importantes, de diriger ces courants de manière qu'ils exercent l'effet maximum, c'est à dire de manière qu'ils soient autant que possible normaux à la direction du champ et à celle du mouvement.

Dans ce but, M. Dobrowolski emploie un induit à tambour formé de conducteurs en cuivre disposés suivant les génératrices d'un cylindre en fer feuilleté destiné à diminuer la reluctance opposée au flux mobile. Ces conducteurs sont réunis de manière à former des spires fermées sur elles-mêmes.

Dans des spires semblables, il n'existe pas de différence de potentiel appréciable; le cas est analogue à celui d'un anneau métallique traversé par un aimant suivant son axe, § 169. On peut donc, ainsi que l'a fait M. Brown, réunir entr'elles les extrémités de tous les conducteurs parallèles et former une sorte de cage d'écureuil, fig. 350. Comme dans ses machines à courant continu, § 394, M. Brown loge les barres de cuivre induites dans le cylindre de fer feuilleté, près de la surface de ce dernier. De cette manière,

il évite les courants de Foucault dans les barres et obtient des induits exceptionnellement solides avec lesquels l'entrefer peut être réduit au minimum.

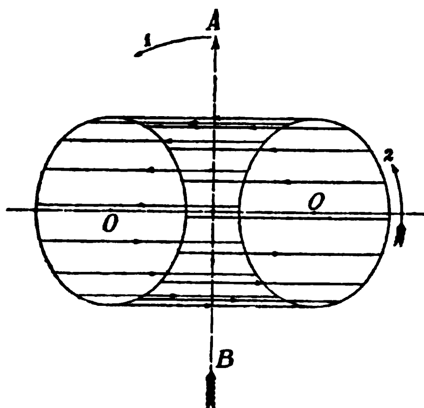



Fig. 350.

La vitesse de rotation des induits précédents ne peut atteindre celle du flux tournant, attendu que le flux ne varierait plus à travers les spires, ce qui annulerait toute induction. On voit donc que le moteur ne tourne pas synchroniquement avec le générateur, comme lorsque l'induit est un aimant. Il prend une vitesse variable avec le couple résistant.

Appelons $n$ le nombre de révolutions par seconde du flux supposé constant et $n'$ le nombre correspondant de tours effectués par l'induit. La vitesse relative du flux et de l'induit est

$$N = n - n'.$$

Dans les moteurs existants cette vitesse relative est faible, environ 0,03 de $n$ à pleine charge.

Tout se passe, en ce qui concerne l'induction, comme si l'induit était immobile et si le flux tournait avec une vitesse N. Les variations du flux à travers une spire sont alors représentées par

$$\mathcal{N} = \mathcal{N}_0 \sin 2\pi N t = \mathcal{N}_0 \sin at.$$

La force électromotrice produite a pour expression

$$e = -\frac{d\mathcal{N}}{dt} = -a\,\mathcal{N}_0 \cos at,$$

et le courant dans la spire,

$$i = -I\cos(at - \varphi).$$

Le travail développé en un temps $dt$ est, § 131,

$$i\,d\mathcal{M} = -I\cos(at - \varphi) \times a\,\mathcal{M}_0 \cos at\,dt.$$

Ce travail est égal à celui du couple moteur électrique $c$ pendant le temps $dt$, soit à $a\,dt \times c$.

Partant le couple est représenté par

$$c = -I\,\mathcal{M}_0 \cos at \cos(at - \varphi).$$

Ce couple est périodique; il est moteur pendant la plus grande partie du temps.

Si l'on considère une spire disposée normalement par rapport à la première, les variations du flux qui la traverse sont représentées par

$$\mathcal{M}' = \mathcal{M}_0 \sin\left(at + \frac{\pi}{2}\right) = \mathcal{M}_0 \cos at.$$

Le courant correspondant est

$$i' = I\sin(at - \varphi)$$

et le couple,

$$c' = -I\,\mathcal{M}_0 \sin at \sin(at - \varphi).$$

Le couple résultant est constant, car il est égal à

$$\begin{aligned} C = c + c' &= -I\,\mathcal{M}_0 [\cos at \cos(at - \varphi) + \sin at \sin(at - \varphi)] \\ &= -I\,\mathcal{M}_0 \cos\varphi. \end{aligned}$$

Ce résultat était à prévoir, car une puissance électrique constante doit donner lieu à un couple invariable, § 585.

S'il y avait $b$ paires de spires, le couple deviendrait

$$b\,C = -b\,I\,\mathcal{M}_0 \cos\varphi.$$

On remarquera qu'au démarrage l'induit est immobile et la vitesse relative égale à celle du flux, $n$. Les courants induits atteignent alors leur plus grande intensité, et le couple est maximum. Dans les machines puissantes, cette intensité de courant est dangereuse, et il faut, à la mise en marche, introduire une résistance, de préférence une résistance inductive ou une résistance liquide, soit dans le circuit inducteur, pour diminuer le flux, soit dans le circuit induit, comme on le verra

ci-après, pour augmenter sa résistance. Cette dernière disposition exige un collecteur, si l'induit est mobile.

Si l'on compare un moteur à flux tournant à un moteur à courant continu, on voit que, dans celui-ci, le flux inducteur et le flux produit par l'induit sont fixes dans l'espace, tandis que, dans celui-là, ces flux sont tous deux mobiles. Comme le moteur à courant continu excité en dérivation, le moteur à flux tournant a une vitesse limite $n$, déterminée par la période des courants inducteurs. Il exige un rhéostat de démarrage, au moins pour les grands modèles, en vue d'éviter la destruction de l'induit. Le moteur à flux tournant possède, d'autre part, l'avantage, propre au moteur en série, de développer un couple de démarrage très élevé.

La dépense d'énergie est faible pendant la marche à vide, bien que les courants alternatifs inducteurs puissent atteindre une intensité notable, justifiée par la production des flux tournants; mais, à ce moment, comme dans les transformateurs, le retard de phase est grand et le courant est minime dans l'induit.

Voici quelques remarques utilisées dans la construction des moteurs à champ tournant.

Il convient de multiplier les pôles inducteurs, ainsi qu'on le fait dans les alternateurs, en vue de réduire la vitesse angulaire. Dans ce cas, la période de variation du flux correspond, non pas à la durée d'une révolution, mais à une fraction d'autant plus faible de celle-ci que le nombre des pôles est plus grand.

L'induit peut recevoir la forme d'un tambour, d'un anneau ou d'un disque. On s'est arrêté au tambour, qui simplifie la construction de la machine et réduit la longueur des conducteurs induits.

Dans les petites machines, l'inducteur est fixe et placé à l'extérieur de l'induit. Il n'existe pas de commutateur, ce qui est un précieux avantage pour des appareils de petites dimensions, qu'on peut ainsi construire et entretenir à peu de frais.

En vue de diminuer les dimensions de l'inducteur, on renverse la disposition ci-dessus dans les grands moteurs où l'induit est à l'extérieur de l'inducteur. On remarquera que la vitesse de déplacement du flux dans l'armature est faible, ce qui réduit considérablement les pertes par hystérésis et permet d'adopter des induits à forte section de fer. Dans l'inducteur, au contraire, les alternances du

flux se succèdent rapidement (40 fois par seconde en pratique) et les pertes dues à l'hystérésis seraient considérables si l'on ne diminuait, autant que possible, les dimensions de cet organe.

La même raison doit faire réduire au minimum l'aire des spires inductrices, en vue d'affaiblir le retard de phase qui nécessite un accroissement de courant pour une puissance électrique donnée. L'inducteur mobile exige des contacts glissants; mais on a vu, ci-dessus, que ceux-ci seraient nécessaires même avec un induit tournant, pour permettre l'introduction du rhéostat de démarrage indispensable avec les grands moteurs.

Les considérations précédentes s'appliquent aussi aux moteurs à courants triphasés, tels que celui figuré schématiquement au § 448.

**588. — Production des courants polyphasés. Dispositifs de M. Schallenberger, de M. Tesla, de MM. Leblanc et Hutin, de M. Schuckert et de M. Dobrowolski.** — En vue de réduire à deux le nombre des fils de ligne, divers moyens ont été préconisés pour alimenter l'électromoteur par un seul circuit de transmission et produire à l'aide d'un alternateur simple deux courants inducteurs décalés l'un par rapport à l'autre.

Le dispositif de M. Schallenberger, § 193, applicable à de petits appareils, a pour but d'induire dans une bobine, inclinée à 45° sur une autre bobine parcourue par le courant principal, un courant dont la phase retarde. Les deux courants produisent un champ tournant d'intensité variable suffisant pour mouvoir un disque induit.

Le procédé de M. Tesla consiste à dériver, par rapport aux deux conducteurs qui amènent le courant alternatif, deux séries de bobines inductrices. Les résistances et les coefficients de self-induction de ces circuits dérivés sont rendus à dessein très différents, de manière à obtenir des constantes de temps et partant des angles de phase très inégaux. Pour réaliser ces conditions, M. Tesla enroule les bobines appartenant aux deux circuits respectivement avec du fil gros et du fil fin.

MM. Leblanc et Hutin ont obtenu un écart correspondant à un quart de période en plaçant dans l'un des circuits dérivés un condensateur constituant une self-induction négative. Ces ingénieurs sont arrivés à produire des condensateurs à papier paraffiné sup-

portant les tensions alternatives, par une formation graduelle qui purifie le diélectrique. M. Swinburne construit des condensateurs industriels formés de feuilles d'étain alternant avec plusieurs épaisseurs de papier mince. Le tout est placé dans une boîte remplie d'huile qu'on chauffe pour éliminer l'humidité; on y fait alors un vide partiel qui extrait l'air, après quoi on ferme hermétiquement le récipient.

Lorsqu'on emploie un générateur à courants diphasés, trois fils de ligne suffisent pour la liaison avec l'électromoteur, le fil de retour commun aux deux circuits étant parcouru par un courant efficace égal à la résultante des courants composants.

On ne pourrait toutefois opérer cette réduction pour réunir le générateur diphasé de M. Schuckert, décrit au § 449, à un moteur de construction analogue, attendu que la liaison des deux fils de retour mettrait une partie de l'induit en court-circuit. Mais on peut recourir à l'intermédiaire de transformateurs aux postes de départ et d'arrivée. Au départ, un transformateur présente deux bobines primaires indépendantes et reliées aux deux circuits induits de la machine. Deux bobines secondaires ayant une extrémité commune sont réunies par trois fils de ligne à un appareil symétriquement disposé à l'autre poste.

Ces transformateurs permettent, dans les transmissions à longue distance, d'élever la tension sur la ligne, en vue de diminuer la section des conducteurs, tout en adoptant des tensions faibles dans les machines. On en verra l'application lors de la description des transmissions de puissance.

Si l'on envoie les courants induits dans le second transformateur dans l'anneau d'une machine Schuckert semblable à la génératrice, on engendre un flux tournant susceptible d'imprimer à cet anneau un mouvement rotatoire, grâce à la réaction des courants induits dans les pièces polaires voisines. Supposons qu'on laisse tourner le moteur à vide ou à faible charge jusqu'à ce qu'il ait pris sensiblement la vitesse du générateur; si l'on excite alors les électro-aimants du moteur par le courant continu recueilli par l'intermédiaire du collecteur qui redresse les courants de l'anneau, le moteur continue à tourner synchroniquement avec le générateur, car il se trouve alors dans les conditions du moteur théorique de la fig. 349.

On apprécie le moment où le moteur mis en marche tourne à peu près à la même vitesse que le générateur en reliant le fil des

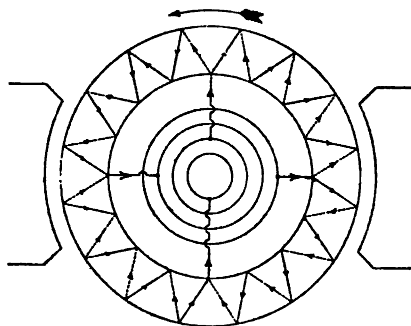


Fig. 351.

électro-aimants à un voltmètre. Comme la vitesse absolue du flux tournant décroît à mesure que la vitesse de l'anneau augmente, la force électromotrice induite dans ce fil diminue jusqu'à une valeur minima.

Il est intéressant de remarquer les fonctions multiples du dispositif de M. Schuckert. C'est à la fois un transformateur de courant continu en courants alternatifs, un transformateur de courants alternatifs en courant continu, un générateur à courant continu, un alternateur, un moteur à courant continu et un moteur à courants alternatifs.

Les courants triphasés peuvent se transmettre par trois fils de ligne, comme on l'a vu au § 448.

Les bobines inductrices excitant le moteur sont reliées aux trois fils conducteurs de différentes manières.

La liaison en triangle groupe les enroulements inducteurs en trois circuits disposés, par rapport aux fils de ligne, comme l'indique la fig. 352.

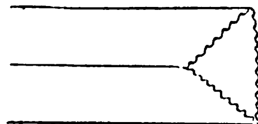


Fig. 352.

La liaison en étoile, déjà examinée au § 448 et représentée schématiquement par la fig. 353, est plus employée. Dans ce cas, les

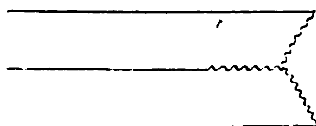


Fig. 353.

courants excitateurs sont égaux et en concordance de phase avec les courants de ligne. Ce dispositif s'applique à une distribution qui comporte non-seulement des moteurs, mais aussi des lampes qu'on dérive alors entre chacun des fils de ligne et un fil de compensation reliant les points de concours des trois branches des étoiles. Ce fil supplémentaire peut, dans certains cas, être remplacé par un retour par le sol.

La fig. 354 présente le schéma du moteur Dobrowolski, enroulé en étoile. L'induit mobile est divisé en 3 circuits raccordés par des

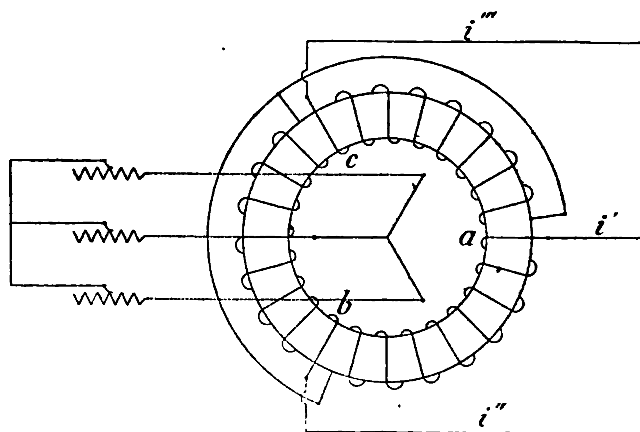



Fig. 354.

contacts glissants à trois rhéostats destinés à réduire l'intensité des courants au démarrage.

Pour obtenir un plus grand nombre de phases et arriver à un champ tournant plus uniforme, M. Dobrowolski a combiné les

deux dispositifs précédents. Les bobines excitatrices sont groupées en six circuits, dont les courants présentent entr'eux des écarts de phase de 60°.

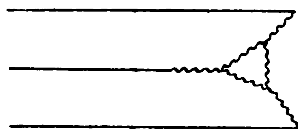


Fig. 355.

# TRANSMISSION ET DISTRIBUTION DE LA PUISSANCE MÉCANIQUE.

---

589. — Dans l'état actuel de nos connaissances, les moyens chimiques et thermiques de génération de l'électricité ne peuvent pas rivaliser avec les procédés dynamiques, en sorte que l'électromoteur est inférieur au moteur à vapeur, en tant que producteur direct de la puissance mécanique. Mais, si l'électricité ne peut pas encore alimenter, avec avantage, directement nos moteurs, elle est appelée dès à présent à servir d'intermédiaire dans la transmission et la distribution de l'énergie.

On peut distinguer deux genres d'exemples.

1° La puissance d'une chute d'eau ou d'une machine à vapeur doit être utilisée en un seul point plus ou moins distant du lieu de production; dans ce cas, deux dynamos réunies par une ligne électrique et tournant l'une comme génératrice, l'autre comme réceptrice, résolvent le problème. Cette application porte le nom de *transport* ou de *transmission* de la puissance mécanique.

2° La puissance électrique, produite dans une station, doit être distribuée dans un périmètre plus ou moins étendu, tel que celui d'une usine ou d'une agglomération quelconque. Le moteur active alors une ou plusieurs dynamos engendrant l'énergie électrique,

sous une tension constante ou sous un courant constant, dans un réseau électrique dont les ramifications s'étendent à tous les petits moteurs alimentés. A ce cas est réservé le nom de *distribution* de la puissance mécanique.

**590. — Théorie du transport de la puissance d'une dynamo génératrice à une dynamo réceptrice.** — Pour simplifier le problème, commençons par supposer que la dynamo génératrice transforme en énergie électrique l'intégralité du travail mécanique dépensé pour la mouvoir, et que la puissance électrique absorbée par l'électromoteur est entièrement restituée sous forme de puissance mécanique. Nous admettrons, en outre, que la canalisation qui relie les deux machines possède un isolement parfait, condition pratiquement réalisable, comme on le verra plus loin. Soient E, la force électromotrice produite par la génératrice; $e$, la force contre-électromotrice du moteur; R, la résistance totale du circuit comprenant la ligne et les dynamos (pour plus de facilité nous supposerons que ces dernières ont des inducteurs composés d'aimants permanents). Le courant est $i = \frac{E - e}{R}$; d'où

$$E\,i = i^2 R + ei, \qquad (1)$$

$Ei$ représentant la puissance dépensée et $ei$ la puissance recueillie. Dans le cas théorique considéré, le rendement électrique de la transmission est

$$\eta = \frac{ei}{Ei} = \frac{e}{E}.$$

Si l'on admet que le générateur est animé d'une vitesse constante, la force électromotrice E est peu variable; l'intensité du courant et, par suite, la puissance dépensée sont alors maxima lorsque l'électromoteur est maintenu immobile. Le rendement est évidemment nul dans ce cas. Lorsque le moteur se met en marche avec une vitesse accélérée, la force contre-électromotrice augmente, de même que le rendement, lequel peut théoriquement atteindre une valeur égale à l'unité. Ce cas idéal correspond à l'égalité des deux forces électromotrices antagonistes, condition qui ne serait réalisable que si les travaux dépensés et recueillis étaient nuls tous deux, ainsi que les

frottements des dynamos. Le cas serait analogue à celui de deux poulies sans frottements, unies par une courroie sans raideur : si la résistance opposée par la poulie réceptrice est nulle, celle-ci est capable de tourner sans dépense de travail à la poulie conductrice.

Le rendement croît progressivement avec la vitesse du moteur. La puissance recueillie, $ei = \frac{E - e}{R} e$, part de zéro ($e = o$), passe par un maximum $\left(e = \frac{E}{2}\right)$ correspondant à la moitié du travail dépensé à cet instant, c'est à dire à un rendement de 50 pour 100; puis elle décroît jusque zéro ($e = E$).

On remarquera que l'énergie dépensée et l'énergie recueillie sont proportionnelles aux tensions des deux machines, tandis que la perte par effet Joule en est indépendante. On conclut de là à la possibilité de diminuer indéfiniment la perte dans une canalisation donnée, en accroissant les tensions des machines. Il conviendra donc d'adopter, pour la transmission électrique de l'énergie, la plus haute tension compatible avec la sécurité des personnes et la conservation des dynamos. Lorsqu'on fait usage de machines et de conducteurs soustraits à la portée du public, les tensions peuvent atteindre sans inconvénient plusieurs milliers de volts. On transmet de cette manière des puissances considérables, à de grandes distances, par des câbles de sections relativement faibles.

Les formules précédentes doivent subir certaines modifications pour être appliquées aux dynamos réelles. Si l'on désigne par P la puissance mécanique absorbée par la génératrice, on a

$$\frac{Ei}{P} = \eta_g.$$

Ce rapport est variable; il atteint 0,90 à 0,97 dans une bonne machine d'une puissance supérieure à 10 chevaux. De même, $p$ étant la puissance disponible sur l'arbre de l'électromoteur,

$$\frac{p}{ei} = \eta_r.$$

Le *rendement industriel de la transmission* est le rapport de la puissance disponible sur l'arbre de l'électromoteur à la puissance absorbée par la génératrice,

$$\frac{p}{P} = \eta \eta_g \eta_r,$$

où $\eta$ exprime le *rendement électrique* $\frac{e}{E}$.

Il est facile de déduire des formules ci-dessus les équations

$$i = \sqrt{\frac{\eta_g P (1 - \eta)}{R}}$$

$$E = \sqrt{\frac{\eta_g R P}{1 - \eta}}$$

$$e = \eta \sqrt{\frac{\eta_g R P}{1 - \eta}},$$

qui permettent de traiter tous les problèmes relatifs aux transmissions électriques de l'énergie.

591. — **Divers modes d'excitation des inducteurs dans une transmission à l'aide de deux dynamos.** — En vue de limiter le courant de haute tension aux induits des deux dynamos et de permettre d'employer des inducteurs à gros fil, traversés par des courants de faible tension, ce qui réduit les chances d'interruptions et d'accidents, on emploie parfois l'excitation séparée.

Au poste de transmission, cette disposition n'offre aucun inconvénient; mais, au poste de réception, il y a une difficulté lors de la mise en marche, puisque l'électromoteur doit être aimanté au préalable sans le secours de son excitatrice. Nous avons déjà rencontré ce problème dans les moteurs alternatifs à excitation indépendante. Ici encore, on peut résoudre la question en pourvoyant la station réceptrice d'une batterie secondaire, suffisante pour donner aux électro-aimants du moteur leur aimantation initiale et provoquer la mise en marche des deux dynamos de cette station. Aussitôt que la dynamo excitatrice a acquis son régime de vitesse, on ferme son circuit sur les inducteurs de l'électromoteur.

M. M. Deprez a imaginé une solution différente. Au début, le courant produit à la station de départ est envoyé simultanément dans les inducteurs et dans l'induit de la réceptrice marchant sans autre charge que son excitatrice. La vitesse ainsi obtenue est suffisante pour provoquer l'amorcement de cette dernière machine

sur une résistance artificielle. Aussitôt ce résultat atteint, les circuits normaux sont rétablis et la charge peut être admise progressivement sur l'arbre de l'électromoteur.

Au lieu d'utiliser une excitation indépendante, il est plus simple de faire usage de deux dynamos excitées en série. Dans ce cas, la mise en marche ne présente aucune difficulté. M. Kapp (1) a reconnu que ce mode de transmission permet de régler automatiquement la vitesse du moteur sur celle du générateur. Soient *oe*, fig. 356, la caractéristique totale de la génératrice tournant à une

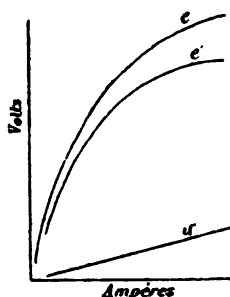



Fig. 356.

vitesse constante, *oe'* la caractéristique totale de la réceptrice également pour une vitesse invariable. Si l'on porte, à partir de l'axe des abscisses, les différences entre les ordonnées des deux courbes correspondant à une même abscisse, on obtient une ligne *or*, qui, en général, ne s'écarte pas sensiblement d'une droite, au moins sur une partie de son développement. On peut d'ailleurs arriver rigoureusement à une droite en calculant le moteur de manière que les différences entre ses ordonnées et celles de la dynamo croissent dans un rapport constant. En choisissant les vitesses des dynamos de telle sorte que cette droite ait un coefficient angulaire égal à la résistance totale du circuit de transmission et en modifiant au besoin cette résistance de manière à obtenir ce résultat, la réceptrice tournera à une vitesse constante tant que l'allure de la génératrice sera invariable. En effet, quelle que soit l'intensité du courant, la diffé-

(1) Kapp, *Electric transmission of energy.*

rence entre la force électromotrice primaire $e$ et la chute de tension $i\,r$ représente une des valeurs $e'$ de la caractéristique inférieure. Il résulte de là que la réceptrice développera des forces contre-électromotrices correspondant à une vitesse constante. Le courant engendré variera avec la charge à vaincre. En appliquant ce procédé, M. Brown est arrivé à réduire les variations des moteurs à 2 pour 100, entre la marche à vide et la pleine charge.

Si l'excitation des machines est faite par d'autres procédés, les conditions de fonctionnement de la transmission se détermineront en ayant égard aux propriétés particulières que communiquent les divers modes d'enroulement tant aux générateurs qu'aux récepteurs.

Lorsqu'on utilise des tensions élevées, l'enroulement en dérivation sur les inducteurs est peu à conseiller, car il conduit à l'emploi de fil très fin, qui accroît beaucoup le prix des dynamos. En outre, les réactions de self-induction conduisent dans un cas semblable à des extra-courants dangereux pour l'isolement des machines.

Il conviendra de choisir avec discernement les modes d'enroulement à employer, en tenant compte de ce fait que, dans une transmission à l'aide de deux machines, le générateur a généralement une capacité de production limitée ; tandis que, dans les distributions importantes où les générateurs sont très puissants relativement aux récepteurs, on peut considérer sans inconvénient la puissance génératrice comme indéfinie.

M. Kapp cite à cette occasion un cas instructif. Il avait cru obtenir une vitesse sensiblement constante dans un moteur en enroulant ce dernier en dérivation et en l'alimentant, sous une tension invariable, par une machine hypercompound, dans laquelle l'enroulement en série était prédominant. Au lieu d'une marche constante et régulière, M. Kapp observa des arrêts et des renversements de marche accompagnés de gerbes d'étincelles aux collecteurs des deux machines. Voici ce qui se produit. Le moteur étant mis en relation avec la génératrice absorbe, au moment du démarrage, un courant très supérieur au courant normal de cette dernière et ses inducteurs ne s'excitent que faiblement. Il en résulte que l'induit du moteur a le temps de prendre une vitesse beaucoup plus grande que sa vitesse de régime avant que les inducteurs soient complètement excités. On a, en effet, $N = \frac{E - ir}{n\,\mathfrak{N}}$, § 571. Mais il

arrive un moment où, par suite du développement de la force contre-électromotrice $e$ du moteur, les inducteurs s'excitent brusquement. La valeur de $e$ devient ainsi supérieure à la force électromotrice du générateur et le courant est renversé dans le circuit. Comme l'enroulement en série de la machine compound prédomine, celle-ci éprouve un renversement de pôles et envoie un courant inverse dans le moteur, qui, après s'être arrêté, se met à tourner à contre-balais jusqu'à ce que ses inducteurs aient perdu leur aimantation. Alors se produit un nouvel arrêt, puis une marche accélérée dans le sens normal jusqu'à ce que l'induit ait acquis de nouveau une vitesse suffisante pour intervertir le courant. Ces renversements ne se produiraient pas si la résistance initiale, opposée à la marche du moteur, était suffisante ou si l'enroulement en dérivation de la génératrice avait une action prépondérante. L'auteur a constaté des phénomènes analogues aux précédents avec une génératrice en série et une réceptrice en dérivation.

L'emploi des génératrices compound est très fréquent dans les petites installations pour le transport de la puissance, où l'on ne peut, comme dans les grandes usines électriques, charger un agent spécial du réglage de la tension.

Au lieu de faire usage de deux dynamos pour la transmission de l'énergie à distance, il est prudent, dans certains cas, de multiplier ces appareils, afin de réduire les chances d'interruption. On pourra adopter les groupements de machines précédemment décrits, dont les plus caractéristiques sont les suivants.

Plusieurs génératrices, excitées en dérivation ou par une dynamo spéciale, sont reliées en parallèle et l'excitation est réglée de manière à obtenir à l'extrémité de la ligne une différence de potentiel constante. Les réceptrices sont également dérivées les unes par rapport aux autres.

Une disposition préférable dans les transmissions à grande distance consiste à réunir en tension plusieurs génératrices. Les moteurs sont installés d'une manière analogue au poste de réception. Par ce moyen, il est possible de maintenir les forces électromotrices des machines dans des limites qui facilitent la construction de ces appareils. Ainsi M. Fontaine a pu, en groupant des machines de 1 500 volts, dont la construction n'offre aucune difficulté, arriver à une tension totale de 6 000 volts

Dans le système en dérivation, au contraire, chaque machine génératrice doit développer la force électromotrice totale. Or, on sait que les collecteurs du genre Gramme se prêtent mal à des tensions supérieures à 2 000 volts, lesquelles amènent souvent des gerbes d'étincelles entre les balais.

Pour obtenir, par le groupement en tension des machines, la même indépendance que dans le groupement en quantité, il suffit de faire usage de conducteurs intermédiaires reliant les pôles communs des dynamos. On réalise de la sorte le système à conducteurs multiples, § 485.

592. — **Emploi des machines à courants alternatifs.** — Grâce aux perfectionnements incessants apportés dans la construction des moteurs à courants alternatifs, il est devenu possible d'établir des transmissions de puissance motrice basées sur l'emploi de ces appareils.

Les machines à courants alternatifs se recommandent par la simplicité de leurs collecteurs, moins sujets que les collecteurs des dynamos continues à être endommagés lorsque les tensions sont élevées. Dans certains moteurs alternatifs, le commutateur a même pu être entièrement supprimé, § 586. Les alternateurs ordinaires permettent d'obtenir une marche absolument synchronique des deux machines en communication. Enfin, l'emploi des transformateurs donne le moyen de réduire d'une façon simple la tension du courant à l'arrivée, lorsque le moteur doit être mis dans les mains de personnes inexpérimentées.

Grâce au rendement élevé des transformateurs à courants alternatifs, on peut aussi, sans diminuer sensiblement l'effet utile de la transmission, adopter une double transformation. La machine génératrice à basse tension alimente un transformateur qui produit les potentiels élevés exigés pour la bonne utilisation du cuivre de la ligne. Au poste de réception, un nouveau transformateur ramène la tension dans des limites convenables. Cette combinaison a l'avantage de permettre l'emploi de machines à faible potentiel, dont la manipulation est sans danger et la construction facile. De telles machines sont en outre susceptibles d'un rendement supérieur à celui des dynamos à haut potentiel, attendu que les isolants y occupent une place beaucoup moindre. Lorsque la haute tension est limitée à la ligne, il n'y a aucun inconvénient à admettre des

potentiels très élevés, car, aux points de vue des dangers et des difficultés d'isolement, il n'y a pas beaucoup de différence entre un potentiel de 2 000 volts, par exemple, et un potentiel de 10 000 volts. La solution précédente permet donc une très grande économie sur le cuivre de la ligne.

A certains égards, les moteurs synchroniques sont inférieurs aux moteurs à courant continu. Nous rappelons que les moteurs à flux constant ne démarrent pas spontanément et que leur charge ne peut pas, comme dans les moteurs continus, dépasser notablement la valeur nominale. Une autre cause d'infériorité résulte de l'essence même des courants alternatifs. Si l'on désigne par E la force électromotrice maxima de la machine génératrice, par I le courant maximum et par $\varphi$ le retard des phases, la puissance moyenne est, dans l'hypothèse d'une fonction sinusoïdale, § 182,

$$P = \frac{E\,I}{2} \cos \varphi ;$$

la perte en chaleur dans le circuit supposé de résistance R est, par seconde,

$$\frac{I^2}{2} R.$$

Il est clair que l'effet de l'angle de phase $\varphi$ est d'exiger, pour une puissance et une force électromotrice données, un courant plus intense et, par suite, une perte en chaleur dans les conducteurs plus grande que si le retard de phase n'existait pas. Par ce fait aussi les dimensions des machines doivent être agrandies pour produire un effet utile donné. Cette majoration est particulièrement marquée dans les dynamos dont les inducteurs sont parcourus par des courants périodiques.

Considérons deux machines à courant continu fonctionnant sous la même tension limite E dans la génératrice. Pour la même puissance, l'intensité du courant continu I' sera telle que

$$E\,I' = \frac{E\,I}{2} \cos \varphi.$$

On aura donc :

$$I' = \frac{I}{2} \cos \varphi ,$$

et la perte en chaleur dans le circuit ne sera que

$$R \frac{I^2}{4} \cos^2 \varphi.$$

Les moteurs à courants polyphasés ne présentent pas le vice de démarrage des moteurs synchroniques. Ces nouveaux appareils possèdent, comme on l'a vu, un couple de démarrage considérable. De plus, pour les petites puissances, ils sont exempts de tout collecteur et peuvent se construire à peu de frais. Ils paraissent donc appelés à jouer un rôle important dans les transmissions de puissance.

593. — **Distribution de la puissance mécanique.** — Nous avons admis, dans ce qui précède, que les génératrices et les réceptrices sont concentrées dans deux postes distincts; les premières étant activées par une force motrice produite à une certaine distance d'une usine où l'on utilise la puissance disponible.

Il existe des applications où, d'un centre de production unique, on doit distribuer l'énergie à une série d'électromoteurs ou de lampes éparpillés dans un espace plus ou moins étendu.

C'est le cas lorsqu'à proximité d'une ville se trouve une chute d'eau qu'on désire utiliser à la distribution de la puissance motrice et de la lumière, ou bien encore lorsque, dans une usine ou une exploitation, on veut concentrer la production de la force motrice dans un atelier spécial, où l'on développe l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation des moteurs et des foyers lumineux. Nous ne ferons qu'énumérer les solutions que peut recevoir la question, en renvoyant, pour les détails, à l'exposé des principes généraux énumérés dans les chapitres précédents.

Si le centre de production est peu éloigné des points d'utilisation, une distribution directe en dérivation sera la solution la plus simple. Mais, lorsque la distance est considérable, il faut, en vue d'économiser le cuivre des conducteurs, recourir à des tensions élevées qui ne peuvent être admises dans les récepteurs autres que ceux des usines où l'on dispose d'un personnel spécial : il est nécessaire alors de faire subir à l'énergie électrique une transformation. Nous savons que l'emploi des transformateurs à courants alternatifs ou à courant continu, ou encore celui des accumulateurs,

fournit le moyen de résoudre la question. La solution par les accumulateurs, chargés en série et déchargés en dérivation, présente l'avantage de permettre un emmagasinement continu et une régularisation commode du débit, ce qui n'est pas à dédaigner lorsqu'on doit utiliser des forces motrices variables; mais le prix actuel de ces appareils en restreint l'emploi.

En ce qui concerne le mode d'enroulement des moteurs à courant continu à adopter, on aura égard au système de distribution et au genre de travail qu'ont à effectuer ces appareils. Le plus fréquemment la distribution a lieu en dérivation. On a vu que le moteur en série, qui se recommande par sa simplicité et par l'effort de démarrage dont il est capable, ne convient que pour autant que la charge ne descende jamais en dessous d'une certaine limite. Cependant, lorsqu'un agent est spécialement préposé à la surveillance du moteur, il n'y a pas à craindre que celui-ci s'emporte et l'on est libre d'adopter, même avec des charges très variables, l'excitation en série. Le moteur excité en dérivation est susceptible de fournir automatiquement une régularisation de vitesse très suffisante dans la plupart des cas. Il a l'inconvénient, lorsqu'on fait usage de tensions de distribution élevées, de nécessiter du fil très mince sur les inducteurs, ce qui accroît le coût de la machine, les difficultés d'isolement et les chances d'accidents par l'effet des extra-courants. Enfin, l'excitation compound à enroulements concourants permet de réunir les avantages des deux systèmes précédents, tandis que l'excitation à enroulements différentiels donne la possibilité d'une régularisation absolue de la vitesse.

Les moteurs à courants alternatifs polyphasés se prêtent à une réduction commode de la tension dans la distribution ou, tout au moins, à la limitation des courants de haute tension aux inducteurs des machines. De plus, ils permettent de supprimer le collecteur dans les appareils de faible puissance et d'arriver ainsi à un prix de construction assez faible pour qu'il soit possible dans les ateliers d'adjoindre un moteur à chaque outil et de supprimer toutes les transmissions mécaniques dont les frottements entraînent des pertes considérables. Afin de varier la vitesse des moteurs suivant le genre de travail des outils, on peut avoir plusieurs génératrices de fréquences différentes, et relier les réceptrices à celles des génératrices qui fournissent la vitesse de rotation la

plus convenable. Une distribution par courants alternatifs donne la latitude d'alimenter directement les moteurs d'usine par des courants de haute tension et de réduire la tension dans les moteurs domestiques et dans les lampes, par l'emploi des transformateurs.

## APPLICATIONS.

594. — **Projet.** — En vue d'appliquer les formules établies au § 590, supposons qu'une puissance motrice disponible de 50 chevaux doive être transmise, à 10 kilomètres de distance, à l'aide de deux dynamos en série, dans lesquelles la force électromotrice maxima tolérée est 2 000 V, et d'une canalisation aérienne pour laquelle on prévoit un taux d'amortissement et d'intérêt de $7\,{}^1/_2$ pour 100. Le prix du bronze ayant une résistance spécifique de 2 mO-cm à 0° C est, par hypothèse, de 3 fr. le kilogramme, pour les fils de gros diamètres. Enfin, le coût annuel d'un kiloW électrique supplémentaire est estimé à 240 francs, ce qui, à raison de 2 000 heures de travail, représente 12 centimes par kiloW-heure, c'est à dire le prix du travail fourni par une machine à vapeur d'une dimension moyenne, lorsque le combustible coûte 20 francs la tonne.

Dans les dynamos de la puissance requise, le rapport de la puissance électrique totale à la puissance mécanique dépensée varie de 0,90 à 0,97. Nous adopterons 0,94 pour la génératrice et 0,92 pour le rapport entre la puissance disponible sur l'arbre de la receptrice et la puissance électrique de celle-ci, cette machine étant supposée avoir la même dimension que la précédente, mais une vitesse moindre.

La puissance électrique à développer par la première est

[1] $$50 \times 736 \times 0{,}94 = 34\,600 \text{ W}.$$

---

(1) Les opérations numériques ont été faites à la règle à calcul.

L'intensité du courant est

$$i = \frac{34\,600}{2\,000} = 17,3 \text{ A}.$$

La règle de Thomson, § 475, indique, pour les données précédentes, la densité de courant

$$\delta = \sqrt{\frac{n a}{p \rho t}} = \sqrt{\frac{0,027 \times 0,075}{\frac{0,12}{1\,000} \times 2 \times 10^{-6} \times 2\,000}} = 65 \text{ A par cm}^2.$$

Pour le courant de 17,3 A, la section sera

$$\frac{17,3}{65} = 0,266 \text{ cm}^2,$$

et le diamètre du conducteur

$$\sqrt{\frac{0,266 \times 4}{3,14}} = 0,583 \text{ cm}.$$

La résistance d'une ligne de 20 kilomètres, aller et retour, posée à l'aide de conducteurs semblables, est d'environ 15 O.

En admettant que les deux dynamos aient chacune une résistance intérieure de 5 O, la résistance totale du circuit devient

$$R = 25 \text{ O}.$$

La chute de tension dans le circuit est

$$25 \times 17,3 = 433 \text{ V},$$

et la force contre-électromotrice

$$2\,000 - 433 = 1\,567 \text{ V}.$$

Le rendement électrique de la transmission est, dans ces conditions,

$$\eta = \frac{1\,567}{2\,000} = 0,785,$$

et le rendement industriel

$$0,785 \times 0,92 \times 0,94 = 0,678.$$

Le rendement commercial de la génératrice est

$$\frac{(2\,000 - 17,3 \times 5)\,17,3}{36\,800} = 0,90.$$

On verra que ces résultats ont été dépassés pratiquement à Kriegstetten. Si le coût de la puissance motrice est supérieur à 240 fr. le kilowatt, on est conduit à une section plus forte pour le conducteur, ce qui améliore le rendement.

*Prix approximatif d'une semblable transmission.*

| | |
|---|---|
| Deux dynamos de 35 kilowatts à 200 fr. par kilowatt, y compris le matériel accessoire . . . . . . | 14 000 |
| Bronze, poids $0,266 \times 2\,000 \times 8,9 = 4\,730$ kg à 3 fr. le kg . . . . . . . . . . . . . . . . . . | 14 190 |
| Poteaux, isolateurs et accessoires . . . . . . . . . | 3 000 |
| fr. | 31 190 |

Cette somme représente les frais d'installation du matériel électrique pour une puissance utile de

$$50 \times 0,678 = 33,9 \text{ chevaux},$$

soit 922 fr. environ par cheval.

595. — **Développements progressifs des transmissions de puissance motrice par l'électricité.** — La première démonstration publique du transport électrique de l'énergie a été faite par M. H. Fontaine, à l'aide de machines Gramme, à l'Exposition de Vienne, en 1873. Depuis lors, la société Gramme a effectué un grand nombre d'installations définitives de transport et de distribution de puissance motrice, en étendant progressivement les distances des transmissions à mesure que les perfectionnements des machines et la réduction de leurs prix permettaient de satisfaire à la fois aux desiderata théoriques et économiques [1].

M. Deprez, qui s'appliqua vers 1880 à l'étude du transport de la puissance par l'électricité, indiqua nettement la nécessité de recourir aux grandes forces électromotrices pour étendre le rayon des transmissions.

Il exécuta une série d'expériences de transport de force à grandes

---

(1) H. Fontaine, *Transmissions électriques*. Baudry, 1885.

distances qui eurent beaucoup de retentissement et qui, si elles ne donnèrent pas tous les résultats qu'en espérait leur promoteur, fixèrent l'attention du grand public sur cet important problème.

Après différents essais exécutés à Munich (1882), à Paris (1883) et à Grenoble (1883), M. Deprez fit, en 1885, des expériences sur une ligne, de 56 kilomètres de longueur, posée entre Creil et Paris et formée de fil de cuivre isolé, de 5 millimètres de diamètre. Le double fil mesurait 100 ohms, auxquels s'ajoutaient 34,5 ohms représentant la résistance des dynamos. Celles-ci étaient excitées par des machines spéciales, ainsi qu'on l'a vu au § 591. Elles étaient de grandeurs différentes, toutes deux multipolaires, et tournaient, la génératrice à 170 tours, la réceptrice à 277 tours. La force électromotrice de la première atteignait 6 000 volts, la plus haute tension produite à cette date à l'aide des dynamos. Le courant était d'environ 10 ampères. De la puissance absorbée de 116 chevaux, il restait à la station de réception environ 52 chevaux, d'où un rendement commercial voisin de 45 pour 100 pour la transmission.

En 1886, M. Fontaine a réalisé au moyen de dynamos Gramme d'un modèle courant, disposées en série, une transmission de force dans des conditions de résistance extérieure analogues à celles de l'expérience précédente. Quatre dynamos excitées en série et réunies en tension étaient commandées par un arbre commun, à l'aide de galets de friction. Elles communiquaient, par l'intermédiaire de résistances artificielles ayant en tout 100 ohms, avec trois réceptrices identiques aux génératrices et rendues solidaires par des manchons d'accouplement.

La tension totale des génératrices tournant à 1 200 tours était 5 900 volts. Le courant ne dépassait pas 9,5 ampères. Le rendement correspondant à une puissance utile de 50 chevaux dépassait 52 pour cent. Le poids total des dynamos, qui atteignait le chiffre exagéré de 70 tonnes dans l'expérience de Creil, n'était que de 8,4 tonnes dans celles de M. Fontaine.

Le plus remarquable essai de transmission électrique à longue distance a eu lieu, à l'occasion de l'Exposition d'électricité de Francfort, entre cette ville et Lauffen qui en est distante de 175 km. Une chute d'eau de 1 500 chevaux, dont 300 sont utilisés à l'aide d'une turbine, a servi, à Lauffen, à actionner une génératrice à courants triphasés du système Oerlikon, § 449. La tension

de 50 volts développée par cette machine a été relevée jusque 25 000 volts par un transformateur à 3 circuits plongeant dans l'huile. La ligne était composée de 3 fils de bronze de 5 mm de diamètre, portés par des isolateurs à huile. Un transformateur à l'arrivée ramenait la tension à 50 volts dans un circuit où l'on pouvait indifféremment introduire des lampes ou un électromoteur à courants triphasés. Le rendement entre la réceptrice du système Dobrowolski et l'arbre de la turbine a atteint 75 pour 100.

**596. — Applications industrielles.** — Les premières expériences, qui eurent surtout un intérêt théorique, donnèrent l'essor à des applications industrielles qui se développèrent particulièrement dans les pays favorisés de chutes d'eau, tels que la Suisse. La société d'Oerlikon a installé, en 1888, entre Kriegstetten et Soleure, sur une distance de 8 kilomètres, une transmission électrique destinée à utiliser la puissance d'une chute d'eau variant de 30 à 50 chevaux et située dans la première de ces localités. Cette application est intéressante, tant par ses résultats que par les mesures très précises auxquelles elle a donné lieu sous les auspices d'une commission présidée par M. F. Weber.

A Kriegstetten, deux dynamos Brown, enroulées en série et associées en tension, sont mûes par une turbine hydraulique. Elles communiquent, par trois conducteurs en cuivre de 6 millimètres de diamètre, avec deux dynamos légèrement plus faibles, installées, à Soleure, dans une usine qui utilise directement la puissance reçue. Le système à trois conducteurs permet de réduire la tension aux bornes de chaque machine et d'assurer le fonctionnement partiel de la transmission lorsqu'une des dynamos vient à être dérangée. La ligne supportée par des poteaux, au nombre de 180, est pourvue d'isolateurs Johnson et Phillipps, § 518. Chacun des trois conducteurs mesure 4,5 ohms et possède un isolement pratiquement parfait. Chacune des dynamos génératrices peut développer, à 700 tours, une force électromotrice de 1 250 volts et un courant de 18 ampères. Leur rendement commercial est de 88 pour 100. La résistance totale des deux génératrices est de 7,25 ohms, celle des réceptrices 7,06 ohms.

La force électromotrice totale fournie par les génératrices en tension était, pendant l'essai, de 2 128 volts, celle des réceptrices de

1 896 volts; d'où un rendement électrique de 89 pour 100. Intensité du courant : 9,78 ampères. La puissance mécanique communiquée par les turbines aux génératrices était de 30,85 chevaux ; la puissance recueillie au frein sur les réceptrices atteignait 23,05 chevaux, d'où un rendement commercial de 74,7 pour 100.

Une autre transmission électrique existe près du lac des Quatre-Cantons. Une chute d'eau, de 60 chevaux de puissance, de la rivière l'Aa, est utilisée pour mouvoir, à une distance de 4 kilomètres, le chemin de fer funiculaire qui relie le bord du lac au Burgenstock situé à 400 m au dessus de celui-ci.

La même transmission permet d'effectuer, le soir, l'éclairage de l'hôtel de Burgenstock, qui absorbe environ 30 chevaux. Enfin, dans les intervalles entre la marche des trains, le courant électrique est utilisé à monter l'eau du lac pour les besoins de l'hôtel.

L'énergie électrique nécessaire à ces divers services est produite par deux dynamos Thury excitées en série et réunies en tension. Chacune développe, à une vitesse de 750 tours par minute, 20 kilowatts utiles avec un rendement industriel de 90 pour 100. Une canalisation aérienne, composée de trois conducteurs en cuivre nu de 4,5 mm de diamètre, relie l'usine hydraulique au Burgenstock et transporte le courant de 20 ampères fourni par les génératrices.

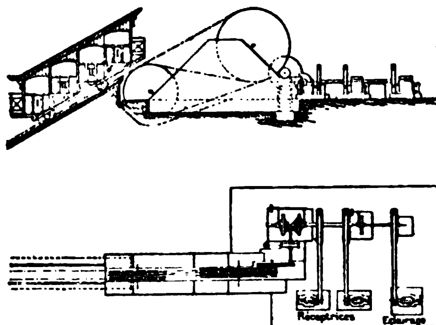



Fig. 357.

Le chemin de fer funiculaire a un développement de 936 m, avec une pente moyenne de 53 pour 100. Deux wagons sont reliés par un câble qui passe, à la partie supérieure du plan incliné, sur deux tambours représentés dans la fig. 357. Les dynamos réceptrices ont à développer un effort égal à la différence des tensions des deux

brins du câble augmentée des frottements. Le tambour supérieur est mu par une transmission figurée en plan et en élévation. La vitesse est régularisée par un frein placé sur l'axe de ce tambour. Un système de roues d'angle à débrayage sert à changer le sens de la rotation du tambour sans modifier celui des dynamos. La troisième dynamo, figurée en plan, sert à alimenter le soir les lampes de l'hôtel.

La Suisse possède plusieurs applications des câbles télodynamiques, qui possèdent un rendement excellent. Toutefois, les difficultés que présentent ces intermédiaires au point de vue de la distribution de la puissance à des récepteurs éparpillés, ainsi que l'usure rapide des câbles, particulièrement par les mauvais temps, leur font actuellement préférer les transmissions électriques.

L'installation de Lauffen, qui a servi à la démonstration du transport de l'énergie à l'Exposition de Francfort, est utilisée maintenant pour la distribution de la puissance mécanique ainsi que pour l'éclairage à Heilbronn, à une distance de 11 km de la première ville. La génératrice de 300 chevaux fournit 50 volts et 4 000 ampères sous une fréquence égale à 40. Un transformateur non immergé dans l'huile élève la tension à 5 000 volts. La ligne consiste en trois fils de cuivre, de 6 mm de diamètre, soutenus, par des isolateurs à huile, sur des poteaux dont la hauteur varie de 8 m, dans la campagne, à 14 m, dans les agglomérations habitées. A l'entrée de Heilbronn, un transformateur ramène la tension à 1500 volts. De là des branchements formés par des câbles à 3 brins concentriques alimentent des sous-stations où sont placés des transformateurs réduisant la différence de potentiel à 100 volts. Le courant est amené aux lampes par les trois fils du système de distribution, dans les installations importantes. Dans les petites installations, on se contente d'introduire deux fils distributeurs. On a cherché à équilibrer, aussi bien que possible, le débit des trois circuits; néanmoins on observe parfois des fluctuations de 3 à 4 volts dans la tension. Quelques électromoteurs, de 1/2 à 6 chevaux, sont alimentés par la distribution. L'intensité des courants polyphasés qu'ils absorbent est sensiblement la même à vide qu'à pleine charge, mais, dans le premier cas, le retard de phase est suffisant pour réduire considérablement l'énergie dépensée. Les électromoteurs dont la puissance dépasse 2 chevaux sont munis d'un

rhéostat de démarrage, afin de ne pas absorber un courant trop intense à la mise en marche, lequel ferait baisser la tension dans les circuits des lampes. Les compteurs employés sont du système Aron.

597. — **Applications à l'art des mines.** — Les transmissions électriques sont appelées à rendre de grands services dans l'exploitation des mines, attendu qu'une même canalisation pourvoit à l'éclairage des travaux et permet d'assurer tous les services nécessitant une force motrice, à savoir: l'extraction, l'abattage, le transport, l'exhaure, la ventilation, auxquels s'ajoutent, dans certains cas, la préparation mécanique et le traitement électrochimique des minerais. La concentration en une seule usine de la production de la puissance motrice permet alors d'utiliser les moteurs les plus économiques. L'emploi de l'électricité rend en outre possibles l'utilisation de forces naturelles et l'exploitation de certaines mines restées improductives par suite de la chèreté du combustible.

Jusqu'à présent, l'agent de transmission le plus employé dans les travaux souterrains est l'air comprimé, à l'aide duquel on a percé les grands tunnels des Alpes. Mais les aéromoteurs ont un rendement médiocre par suite de la difficulté opposée par le refroidissement de l'air à l'emploi de la détente. Il est vrai que le réchauffage de l'air et l'injection de vapeur (systèmes Cornet, Popp) permettent d'améliorer le rendement, mais ces procédés nécessitent des foyers, compliquent les moteurs et, partant, ne sont guère applicables aux travaux des mines, où les appareils doivent être simples et faciles à conduire et où les fumées de foyers sont inadmissibles. A cet égard, les moteurs électriques présentent toute satisfaction, puisque leur rendement est élevé et qu'on peut les rendre auto-régulateurs en enroulant convenablement leurs inducteurs, § 573. En outre, les canalisations électriques suivent aisément les galeries les plus tortueuses, tandis que les tuyaux rigides nécessités par l'air comprimé demandent une main-d'œuvre coûteuse de mise en place. Dans les tunnels, l'air frais dégagé par les aéromoteurs ne constitue pas une ventilation suffisante pour permettre de se passer d'appareils d'aérage spéciaux ; dans les travaux de mines ordinaires, la quantité d'air apportée par ces moteurs est relativement plus faible encore.

Étant donnés les avantages des électromoteurs, leur emploi ne tardera pas à se développer dans les exploitations minières où l'atmosphère n'est pas chargée de gaz inflammables, comme c'est le cas dans les mines à grisou. Dans ces dernières, on pourra faire usage de moteurs sans collecteurs, tels que les moteurs polyphasés. M. Goolden emploie, dans ces circonstances, des moteurs à courant continu complètement entourés d'une enveloppe métallique emprisonnant un faible volume d'air et portant des orifices de ventilation fermés par des grillages. Les interrupteurs et autres appareils susceptibles de donner des étincelles seront enfermés dans des boîtes hermétiquement closes et traversées par les tourillons des arbres de manœuvre. Dans les interrupteurs, les étincelles sont d'ailleurs réduites par l'insertion progressive de résistances dans le circuit avant la rupture.

Dans les mines à grisou, on ne peut procéder à la soudure des joints des câbles, par suite de l'interdiction des lampes à souder. On est obligé d'étamer à l'avance les bouts des conducteurs à réunir et de les serrer dans des mâchoires qu'on enferme ensuite hermétiquement. De la sorte, si un joint devient défectueux, les étincelles qu'il occasionne sont sans danger.

M. Atkinson a imaginé un câble de mine dont la rupture ne provoque pas d'étincelles. Le conducteur du câble est double. Une partie de forte section est disposée autour d'un conducteur central séparé. Ce dernier, dont la section est faible, est enroulé en hélice. Si une traction rompt le conducteur extérieur, le courant passe tout entier par l'hélice centrale qui peut s'allonger considérablement, et le fil fusible qui la protège au tableau de distribution fond avant qu'elle soit rompue.

Pour favoriser le développement de ces applications, il est important que les constructeurs électriciens se donnent la peine d'étudier les appareils de mines et cherchent au besoin des types spéciaux appropriés aux électromoteurs, dont la vitesse de rotation est généralement considérable. C'est ainsi que les perforatrices et les haveuses mues directement par des moteurs électriques ont été étudiées en France par M. Taverdon, en Angleterre par M. Blackburn, aux États-Unis par MM. Van Depoele et Edison et en Belgique par M. Dulait.

Le cadre de cet ouvrage ne nous permet pas de multiplier les

exemples d'applications de l'électricité aux travaux des mines [1]. Nous nous contenterons de citer un cas montrant l'amélioration de rendement obtenue par la substitution de l'électricité à l'air comprimé.

Au charbonnage Saint-Jean, à Normanton (Angleterre), une pompe souterraine, mue par une dynamo, est destinée à élever 530 litres d'eau à la minute à une hauteur de près de 300 mètres.

La machine génératrice, qui produit un courant de 62 ampères sous une tension de 603 volts, fait 450 révolutions par minute. Le câble a une résistance de 0,5 ohm. Le moteur fait 450 tours par minute et la pompe 25 tours.

La puissance indiquée, de 73 chevaux, à la machine motrice se répartit comme suit dans les divers organes de la transmission :

| | | |
|---|---|---|
| Frottements de la machine motrice . . . . . . | chevaux | 6,9 |
| Pertes dans la courroie et la machine génératrice. | » | 4,8 |
| Pertes dans le câble et le moteur. . . . . . . | » | 6,7 |
| Pertes dans la courroie, l'arbre de transmission et la pompe marchant à vide . . . . . . . . . | » | 10,2 |
| Puissance absorbée par l'élévation de l'eau . . . | » | 31,5 |
| Pertes dues au frottement de l'eau dans la colonne ascensionnelle et dans la pompe . . . . . . | » | 12,9 |
| Total : | chevaux | 73,0 |

La perte considérable, due au frottement de l'eau, tient à une section insuffisante du tuyau de remonte. Malgré ces conditions défectueuses, on voit que la transmission électrique rend $\frac{31,5}{73,0}$, soit environ 43 pour 100 du travail indiqué à la machine à vapeur. La transmission par l'air comprimé qui faisait auparavant le même service rendait au maximum 14 pour 100.

A la suite de ces résultats, les appareils à air comprimé, qui servaient à mouvoir un transport intérieur dans le même charbonnage, ont été remplacés par une transmission électrique..

(1) Voir : SALADIN, *Le matériel électrique dans les mines*, Bull. de la Soc. int. des électr. Décembre 1891.

MASSON, *Revue universelle des mines*, 1892.

598. — **Distributions électriques dans les usines.** — Les transmissions par câbles ou par courroies donnent un rendement élevé dans les ateliers, lorsque tous les outils et métiers qu'elles commandent sont simultanément en activité ; mais, par suite de la variabilité du fonctionnement des outils dans les ateliers mécaniques, le rendement moyen est souvent inférieur à 50 pour 100, même lorsqu'on emploie des manchons de débrayage, afin d'isoler les parties des arbres portant les poulies de commande des outils. M. Lufkin, qui a mesuré la répartition de la puissance motrice dans un grand nombre d'ateliers américains, est arrivé à la conclusion que les trois huitièmes de cette puissance sont utilisés en moyenne, les cinq huitièmes étant perdus dans les transmissions.

Le poids des organes des transmissions mécaniques ainsi que les vibrations et les tractions que celles-ci déterminent nécessitent des charpentes massives qu'on évite par l'emploi des transmissions électriques. La machine motrice de l'usine active des dynamos qui transmettent le mouvement, par des conducteurs, à des électromoteurs disposés dans les ateliers et activant les outils ou métiers soit directement, soit par des arbres de manège qu'on peut rendre très légers à cause de leurs grandes vitesses de rotation. Ces moteurs ne sont mis en marche qu'au moment du besoin ; ils développent alors un effort proportionné à la résistance et consomment une quantité d'énergie en rapport avec le travail effectué. Grâce à la facilité de placement des câbles électriques, il est possible d'étendre le réseau des électromoteurs à des ateliers très distants les uns des autres, qui, dans le cas de transmissions mécaniques, exigeraient plusieurs machines motrices. La concentration dans une seule halle des appareils moteurs amène une notable économie de main d'œuvre et de frais de premier établissement.

Lorsqu'il est important d'éviter un arrêt, même momentané, de l'usine, il convient de diviser la puissance motrice en plusieurs groupes comprenant chacun un moteur à vapeur et une dynamo.

La légèreté des moteurs électriques rend possible le transport de l'outil auprès de la pièce à travailler, lorsque celle-ci est très lourde. Ainsi, quand il s'agit de perforer des trous dans un corps de chaudière, la foreuse et le moteur qui l'attaque directement peuvent s'appliquer contre la masse de fer et y être maintenus en place par l'adhérence d'un électro-aimant faisant partie du moteur.

M. Rowan a réalisé des appareils spéciaux pour ce genre d'applications. Ajoutons qu'il y a un grand avantage à combiner à la transmission de la force l'éclairage par l'électricité, qui a sa place marquée dans toutes les usines importantes. Cette combinaison donne lieu à une économie d'appareils et de personnel.

Déjà de nombreux établissements, parmi lesquels les ateliers Ducommun de Mulhouse, la fonderie de canons de Ruelle, les chantiers de la Buire, ont substitué les transmissions électriques aux procédés mécaniques usuels.

L'application la plus importante est celle exécutée par la Compagnie internationale d'Électricité à la nouvelle Fabrique d'armes de guerre, à Herstal, près de Liége. Nous donnerons quelques détails sur cette installation remarquable. L'usine comporte une halle de 1 hectare de superficie, où les machines-outils sont groupées sur 9 arbres absorbant 16 chevaux chacun. En outre, divers ateliers renferment des arbres exigeant de 3 à 40 chevaux. Le poids total de ces arbres et de leurs supports est évalué à 50 000 kg. M. L. Castermans, qui étudia le projet de l'usine en vue de concentrer la puissance motrice dans un seul atelier, reçut des offres de divers constructeurs pour des transmissions mécaniques par câbles et par courroies. Ceux de ces systèmes les plus avantageux exigeaient un supplément de 70 000 kg. pour les arbres et les poulies intermédiaires. Ces transmissions entraînaient un renforcement sérieux des charpentes des bâtiments. De plus, elles nécessitaient des modifications importantes en cas d'agrandissement de l'usine et imposaient une ordonnance déterminée des ateliers. Enfin, aucun constructeur ne voulut garantir un rendement pour les transmissions mécaniques.

La Compagnie internationale d'Électricité proposa un procédé de transmission électrique combiné à l'éclairage, en garantissant un rendement général de 70 pour 100 entre la puissance totale fournie par les réceptrices et la puissance absorbée par la génératrice, laquelle est attaquée directement par un moteur de 500 chevaux. Eu égard à l'allégement des charpentes, ce système peut supporter la comparaison avec ses rivaux au point de vue du prix d'installation. Il permet tous les agrandissements, car il est toujours possible d'ajouter de nouveaux électromoteurs sans toucher à ceux qui sont installés. Il est le seul qui se prête aisément au débrayage des transmissions et à la variation de vitesse de celles-ci.

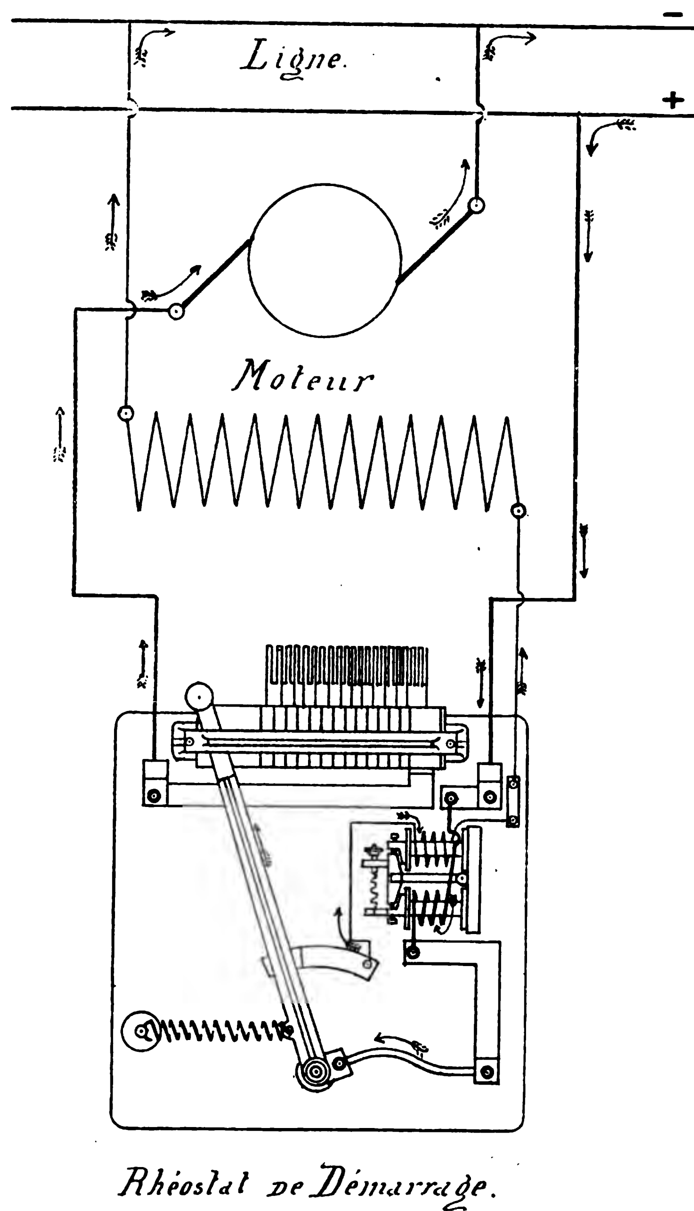
Il rend possible de disposer les ateliers dans un ordre logique au point de vue des manipulations, sans avoir à s'inquiéter de la position des arbres.

Mais où le système électrique montre toute sa supériorité, c'est dans l'économie de puissance motrice qu'il procure. En admettant que le rendement des transmissions mécaniques atteigne 70 pour 100 à pleine charge, chiffre qu'aucun mécanicien n'a voulu garantir, ce rendement diminue très rapidement lorsque l'effort demandé décroît, parce que les pertes par frottements de ces transmissions sont sensiblement indépendantes du travail transmis. Avec les dynamos, au contraire, la perte dans les inducteurs est seule constante; la perte dans les induits et dans les câbles diminue avec la charge. Or, le rendement à charge réduite a une importance capitale; les expériences de M. Mélotte ne laissent aucun doute à cet égard (1). En relevant par des enregistreurs Richard la puissance consommée par les moteurs, il a reconnu qu'un arbre absorbant 7,3 chevaux en moyenne présente des fluctuations de charge comprises entre 11 et 5 chevaux.

Si une résistance accidentelle se produit dans les outils, le moteur électrique est capable de développer momentanément un effort très supérieur à l'effort normal. Au-delà, un interrupteur automatique rompt le circuit, en y introduisant des résistances croissantes pour éviter les étincelles au commutateur; avec une transmission mécanique, il faut, dans un cas semblable, qu'une pièce se brise ou qu'une courroie saute.

La fig. 358 représente le rhéostat de démarrage, système Pieper, employé à Herstal. Un courant gradué est d'abord envoyé dans l'induit du moteur, par la manœuvre du levier figuré à la partie inférieure du dessin. Ce levier supprime successivement du circuit de l'induit les résistances métalliques additionnelles, après avoir fermé le circuit des inducteurs en dérivation. Il est enclenché à fond de course, grâce à l'armature d'un petit électro-aimant dont la bobine supérieure est traversée par le courant dérivé. La bobine

(1) Mélotte, *La Fabrique d'armes de guerre*, Revue universelle des Mines, 1892.




Rhéostat de Démarrage.

Fig. 358.

inférieure, parcourue par le courant principal, exerce une action plus faible que la précédente.

Si le courant principal augmente au-delà d'une certaine limite, par suite d'un effort exceptionnel opposé au moteur, ou encore si

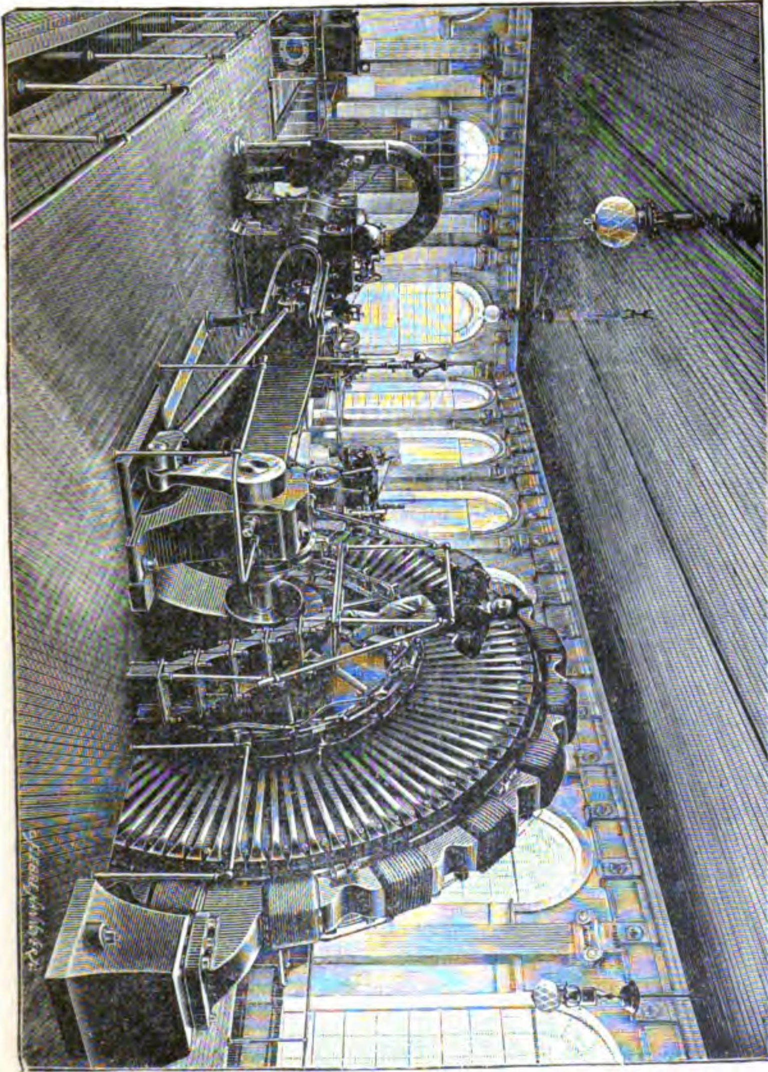


Fig. 359.

le circuit des inducteurs est rompu accidentellement, la bobine en série prend une action prédominante et déclenche le levier qui interrompt progressivement le courant dans l'induit, grâce au ressort à boudin qui le sollicite.

L'expérience faite à Herstal a eu un plein succès. La fig. 359 montre la disposition de la halle motrice. Lorsque le projet de la transmission électrique a été étudié, la machine à vapeur était déjà commandée. Celle-ci, du système Corliss, donne 500 chevaux à la vitesse de 66 tours par minute. La Compagnie internationale d'Électricité a dû réaliser une dynamo d'un type tout spécial pour cette faible vitesse. L'induit constitue le volant de la machine à vapeur. Le noyau de l'induit est supporté par deux flasques de fonte dentées pour diminuer les courants de Foucault; ces flasques sont elles-mêmes fixées à un moyeu calé sur l'arbre à la presse hydraulique. L'âme de l'induit est constituée par des segments annulaires à joints alternés; les segments sont maintenus par des boulons isolés traversant les dents des flasques. Une couronne d'inducteurs en acier entoure l'induit; elle est formée d'éléments ou de voussoirs dont les joints étranglés se font à l'endroit des pôles, en vue de réduire les flux transversaux.

On installe en ce moment une seconde unité génératrice pour faire face à de nouveaux besoins de puissance motrice. Ainsi disparaîtront les craintes que la présence d'une seule machine productrice avait justifiées.

Bien qu'il y ait dans cette application un progrès industriel sérieux qui amènera de nombreuses installations semblables, on peut se demander s'il ne convient pas d'aller plus loin encore et de munir chaque outil de son moteur. M. Mélotte a reconnu que les arbres et les transmissions intermédiaires de la Fabrique d'armes absorbent encore 55 pour 100 de la puissance des dynamos. Grâce aux perfectionnements réalisés dans la fabrication des machines électriques, il faut espérer qu'on arrivera à construire les petits moteurs à un prix assez bas et avec un rendement assez bon pour permettre de supprimer complètement les transmissions communes. Déjà MM. Siemens et Halske ont appliqué dans un de leurs ateliers de Charlottembourg la règle d'un moteur par outil. Pour un tour, par exemple, le moteur est placé sur une plate-forme articulée sur le socle du tour. L'appareil entraîne par courroie un arbre inter-

médiaire également porté par un bras articulé; une nouvelle courroie agit sur la poulie du tour. Ces petites courroies sont ainsi tendues grâce aux poids du moteur et de l'arbre de transmission. MM. Siemens et Halske assurent que l'installation n'est pas sensiblement plus coûteuse que celle des grands arbres de transmission avec embrayages pour les tours. Le rendement général est amélioré parce que les outils ne marchent jamais à vide.

599. — **Applications diverses.** — Le développement des distributions d'énergie électrique a donné une grande extension aux électromoteurs employés pour activer des ventilateurs, des machines à coudre, des presses à imprimer, des ascenseurs, des métiers, ainsi que les outils des ouvriers en chambre ou des petits ateliers.

A New-York, une usine à vapeur de 700 chevaux, créée par M. Daft, alimente exclusivement des moteurs électriques éparpillés dans la ville. On comptait, en 1889, aux États-Unis, environ 15 000 électromoteurs appliqués à plus de 200 industries et usages différents.

Ce qui rend les moteurs électriques plus avantageux que tous les autres dans les petites installations, c'est leur exiguïté, leur prix peu élevé, la facilité de leur conduite, leur régularisation automatique, leur propreté et l'absence de chaleur, de fumée et d'odeur.

Les cuirassés, qui utilisaient des moteurs à vapeur pour la manœuvre des lourdes pièces d'artillerie et des cabestans, commencent à recourir pour ces services aux moteurs électriques plus simples et plus faciles à conduire.

600. — **Modes divers de transmission de la puissance mécanique.** — Une des préoccupations de l'ingénieur est la recherche de procédés de transmission et de distribution de l'énergie. Au point de vue de l'intérêt général, il serait désirable de voir utiliser les immenses puissances naturelles que la nature met à la disposition de l'homme.

Sans parler de la force du vent ni de celle des marées, qui exigeraient pour être recueillies en quantité notable des installations extrêmement dispendieuses, il existe d'énormes chutes d'eau qui, bien qu'éloignées des centres industriels, pourraient être mises à

profit. Pour prendre un exemple célèbre, la chute du Niagara récèle une puissance de plus de sept millions de chevaux-vapeur, qui n'a d'autre emploi que d'élever d'un cinquième de degré centigrade la température de l'eau.

On crée, en ce moment, au Niagara, un canal latéral destiné à recueillir une puissance de 150 000 chevaux qui seront distribués aux villes voisines, jusque Buffalo qui se trouve à 32 kilomètres de distance.

Les pays montagneux renferment souvent des minerais qui n'ont pas pu être exploités par suite des difficultés d'accès du charbon. Il y a généralement dans ces contrées des chutes d'eau peu distantes des dépôts miniers et qui seraient capables de fournir l'énergie nécessaire à l'extraction, au transport, à la préparation mécanique, voire même au traitement par voie électrochimique du minerai. Dans d'autres cas, les chutes d'eau placées à proximité des agglomérations populeuses pourraient être employées pour éclairer les rues et les habitations et fournir la force motrice.

Ce genre d'applications, particulier aux contrées montagneuses, se développera de plus en plus avec le renchérissement du combustible. Mais le temps est encore éloigné où la présence de forces naturelles justifiera le déplacement d'industries actuellement concentrées dans les pays charbonniers. Dans ceux-ci des applications d'un ordre différent sont appelées à un avenir immédiat. C'est le cas des distributions électriques lorsque la puissance d'une grande machine à vapeur produisant l'énergie mécanique à peu de frais peut être utilement répartie aux alentours. Dans les villes, l'utilisation des petits moteurs pour les usages domestiques augmente de jour en jour. Le travail en chambre, si recommandable au point de vue du développement moral de l'ouvrier, trouve dans les moteurs à bon marche un élément de progrès et de prospérité. Déjà, dans certaines villes, de petits industriels se groupent autour d'un atelier pourvu d'un moteur à vapeur, dont ils utilisent une partie de la puissance.

Bien que le sujet ne rentre pas dans le cadre de cet ouvrage, il est donc intéressant de jeter un coup d'œil sur les agents, autres que l'électricité, qui se prêtent à la transmission et à la distribution de la puissance motrice.

Les intermédiaires les plus répandus sont les câbles, l'eau sous pression, l'air comprimé et le gaz.

La transmission par câbles a été employée, en Suisse, à Schaffhouse et à Bellegarde pour l'utilisation de chutes d'eau. Des turbines établies au pied des chutes recueillent la force motrice et la transmettent aux usines du voisinage au moyen de câbles sans fin. Les poulies de renvoi peuvent être écartées de 100 m. Lorsque la distance des usines est plus considérable, on fait usage de poulies de relais montées sur des bâtis spéciaux.

La transmission par câbles est celle qui donne l'effet utile le plus élevé pour les faibles distances. D'après M. Ziegler, l'effet utile d'un câble de renvoi est de 96 pour 100. Chaque relais n'occasionne par conséquent qu'une perte de 4 pour 100 du travail transmis.

Mais les câbles sont des intermédiaires très incommodes. Ils se détériorent rapidement, particulièrement dans la mauvaise saison, et doivent être renouvelés presque chaque année. En outre, ils se prêtent mal à la division de la force et le système n'est applicable que dans un rayon de peu d'étendue. Par suite de ces inconvénients, on complète actuellement par des transmissions électriques plusieurs de ces installations par câbles qui ont fait l'orgueil des ingénieurs suisses.

L'eau sous pression est un intermédiaire plus docile que les câbles. Elle a été employée avec succès pour mouvoir des engins dans les ports et dans certaines usines. L'eau est refoulée par des pompes dans des accumulateurs, d'où elle se rend par une canalisation dans des moteurs hydrauliques. Les réservoirs d'eau d'alimentation publique forment dans certaines villes des accumulateurs qui peuvent être utilisés pour mettre en marche de petits moteurs. Les meilleurs moteurs hydrauliques n'ont pas un rendement supérieur à 70 pour 100. Ce chiffre doit être diminué de la perte qui se produit dans les pompes de compression. Les frottements dans les tuyaux amènent une chute de pression qui devient considérable dans une canalisation étendue. En s'ajoutant, ces différentes pertes réduisent l'effet utile au point qu'à part certains cas spéciaux, on ne peut songer à établir une distribution hydraulique importante que dans les villes où l'eau est destinée à l'alimentation des habitants.

L'air comprimé se prête mieux que l'eau au transport de la puissance. On l'emploie beaucoup dans les travaux des mines et dans le percement des tunnels. Tandis que l'évacuation de l'eau présenterait des difficultés, l'air qui sort des moteurs vient en aide aux procédés ordinaires d'aérage des galeries. Malheureusement, le travail qu'on dépense pour amener l'air sous pression est perdu en partie par suite de l'échauffement de celui-ci. D'un autre côté, l'emploi de la détente dans les moteurs est limité par le refroidissement de l'air.

Le rendement des meilleurs compresseurs d'air ne dépasse pas 70 pour 100. D'autre part, les aéromoteurs, dans lesquels on pousse le degré de détente aussi loin que le permet la nécessité d'éviter l'engorgement des conduites d'échappement par la neige provenant de la condensation de l'humidité de l'air, ne donnent, d'après les expériences de M. Kennedy, qu'un rendement de 60 pour 100. En admettant un déchet de 15 pour 100 dans une conduite de 5 kilomètres, pour tenir compte des pertes par les frottements et les fuites d'air, on arrive à un rendement total qui ne dépasse pas sensiblement 35 pour 100. En réalité, malgré les perfectionnements qu'une expérience déjà longue a suggérés, la transmission par l'air comprimé ne donne pas, dans nos mines, un rendement moyen supérieur à 20 pour 100. La distribution d'air comprimé établie à Paris se fait à l'aide de tuyaux posés en majeure partie dans les égouts et dont les joints très soignés sont facilement visitables. Par suite du grand nombre de joints, les fuites d'air s'élèvent à 12 pour 100 environ de la quantité d'air transmise. C'est également le taux de perte constaté dans beaucoup de distributions de gaz où la pression n'est que de quelques centièmes d'atmosphère, au lieu de s'élever à 4 ou 5 atmosphères comme dans les conduites d'air de Paris.

L'effet utile des aéromoteurs est notablement amélioré par un chauffage préalable de l'air et surtout par un chauffage combiné avec une injection de vapeur d'eau, moyens qui permettent d'étendre considérablement la détente, grâce à la provision de calorique communiquée à l'air. Dans ces conditions, M. Radinger a pu obtenir pour l'aéromoteur seul un rendement de 92 pour 100, moyennant une dépense supplémentaire de 0,5 kg de coke par cheval-heure pour le chauffage de l'air et de l'eau.

L'effet utile total de la transmission peut alors monter à 55 pour 100. Mais le chauffage de l'air et l'injection de vapeur exigent des appareils qui demandent une surveillance spéciale et échauffent les locaux. On ne peut guère y avoir recours qu'avec les aéromoteurs d'une certaine puissance. En fait, dans les appareils usuels, on n'emploie pas l'injection de vapeur. Parfois, on utilise le refroidissement dû à la détente de l'air pour la conservation des denrées alimentaires ; mais, de nouveau, il faut une surveillance spéciale qui n'est possible que dans des établissements importants. La production de la glace à bon marché résoud beaucoup plus simplement le problème de la conservation des comestibles chez les particuliers. A l'usine de la Bourse du Commerce, à Paris, où l'électricité est produite par des moteurs à air, on a créé des chambres froides louées par parties aux débitants de denrées alimentaires du voisinage. Le froid est alors un sous-produit dont la vente compense une partie de la dépense occasionnée par la perte d'énergie dans la transmission. Toutefois, les applications du froid sont assez restreintes dans les climats tempérés, surtout en hiver, époque à laquelle se fait la grande consommation de puissance motrice pour l'éclairage.

Les dynamos sont des transformateurs d'énergie très supérieurs aux compresseurs et aux moteurs à air. On construit à l'heure actuelle des machines électriques fournissant des rendements industriels qui dépassent 90 pour 100. En se basant sur ce chiffre, on arrive, pour le rendement combiné du moteur et du générateur, à 81 pour 100. D'autre part, les canalisations à haute tension employées dans les villes n'occasionnent pas, avec la transformation, une perte supérieure à 15 pour 100. Il en résulte qu'on peut atteindre dans les villes près de 70 pour 100 d'effet utile au moyen des transmissions électriques.

Il convient d'observer que des considérations particulières peuvent faire donner la préférence à l'un ou à l'autre système de transmission. Ainsi, en même temps qu'elles fournissent la force motrice, une canalisation d'électricité peut servir à l'éclairage, une canalisation hydraulique à la distribution de l'eau destinée à l'alimentation, une canalisation d'air comprimé à l'aérage des mines ou à la production du froid. Mais, dans les villes, la grande consommation d'énergie est faite pour l'éclairage. Dans les conditions

actuelles, l'énergie utilisée par les moteurs employés dans les ateliers ne représente qu'une fraction minime de celle qu'absorbent les lampes. Voici une preuve décisive à cet égard. A Bruxelles, où le prix du gaz pour la force motrice et les foyers domestiques n'est que de 10 centimes le $m^3$, alors que le prix du gaz pour l'éclairage est de 15 centimes, la consommation horaire moyenne pour moteurs et foyers n'a atteint que 50 $m^3$ en décembre 1889, tandis qu'elle arrivait à 15000 $m^3$ pour les lampes. Les autres applications, production du froid, travaux électrochimiques, etc., n'absorbent qu'une puissance négligeable.

Il en résulte que les agents les mieux doués pour la lutte sont ceux qui peuvent fournir directement la lumière ; c'est le cas pour le gaz et l'électricité. Le gaz l'emporte généralement en Europe au point de vue du prix de revient, mais les lampes et les moteurs à gaz ont des inconvénients qui les rendent inférieurs aux lampes et aux moteurs électriques. L'électricité se prête, en outre, à la traction des tramways, application dont l'importance croît de jour en jour. Les autres agents, tels que l'air et l'eau, ne produisent qu'indirectement la lumière, par des appareils compliqués qui réduisent singulièrement l'efficacité des transmissions.

# TRACTION ÉLECTRIQUE. (1)

## NOTIONS GÉNÉRALES.

**601.** — La traction des tramways est devenue l'une des applications les plus importantes des électromoteurs. Étudiée d'abord en Europe, elle s'est particulièrement développée aux États-Unis, où elle a rencontré dans l'esprit pratique des Américains les conditions d'une extension rapide. En moins de 3 ans, 130 villes de l'Union ont adopté la traction électrique sur des lignes comprenant un développement total de 3 200 kilomètres de voie. Sur ces lignes circulent 3 830 voitures animées par 6 400 moteurs électriques et exigeant 94 880 chevaux de puissance.

La raison principale de ce succès réside dans l'économie que procure la traction électrique, ainsi que dans les avantages que celle-ci présente sur la traction animale au point de vue de l'exploitation. Grâce à la facilité d'arrêt et de renversement de marche des électromoteurs, on a pu, sans causer d'accidents, accroître de plus

(1) Crosby et Bell, *The electric Railway*, New-York, Johnston, 1892. Reckenzaun, *Electric Traction*, Londres, Biggs, 1892.

de 50 pour 100 la vitesse normale des voitures. La vitesse n'est d'ailleurs pas limitée comme dans le cas de la traction animale; aussi atteint-on aisément l'allure de 50 kilomètres à l'heure dans les tramways électriques suburbains. En outre, on a pu gravir des rampes qui étaient considérées comme impraticables avec les chevaux. Par suite des facilités et des économies qu'elle procure, on a remarqué aux États-Unis que la traction électrique donne lieu à un accroissement de trafic. Sur certaines lignes, on a dû augmenter les dimensions des véhicules ou former des trains de plusieurs voitures. Enfin, la traction électrique permet à un moment donné, à l'occasion d'une fête par exemple, de multiplier les voitures en service, tandis qu'on ne pourrait entretenir toute l'année les chevaux de réserve nécessaires dans une telle circonstance.

**602. — Modes d'emploi des moteurs.** — Les moteurs électriques ont une élasticité qui les rend particulièrement propres à la traction des véhicules. Admettons qu'une voiture soit mue par un électromoteur alimenté par un courant électrique, sous une tension constante. C'est au démarrage que l'effort de traction doit être le plus grand ; or, à ce moment, l'électromoteur est au repos, le courant fourni par le générateur atteint sa plus haute valeur et le couple moteur est maximum. L'effort ainsi développé est susceptible d'atteindre une valeur très supérieure à celle de l'effort normal, ce qui n'est pas le cas pour les autres moteurs, tels que la machine à vapeur dans laquelle la force exercée sur le piston dépend de la pression à la chaudière. Lorsque le véhicule se met en marche, le courant faiblit et le travail dépensé par le générateur diminue avec la vitesse. Quand la voiture descend une pente sous l'action de la gravité seule, on interrompt généralement le circuit. Mais rien ne s'oppose théoriquement, si l'électromoteur acquiert une vitesse suffisante, à ce qu'on utilise l'énergie qu'il développe pour charger des accumulateurs ou alimenter d'autres moteurs reliés en dérivation avec le premier. Si ce mode de récupération n'est pas possible à cause des arrêts trop fréquents des véhicules, tout au moins peut-on envoyer le courant électrique produit par la dynamo dans des résistances artificielles portées par la voiture. Dans les deux cas, l'électromoteur fait fonction de frein et le travail déve-

loppé par le véhicule est absorbé sans amener l'usure des roues, comme cela arrive avec les freins ordinaires qui agissent par le frottement de sabots sur les bandages ou, ce qui est pis, par le glissement des roues sur les rails.

Pour changer le sens de marche, il suffit de renverser le courant soit dans l'induit, soit dans les inducteurs. Afin de ne pas avoir à modifier la position des balais, on emploie des machines à faible décalage. Les frotteurs sont fixés d'une manière invariable à la ligne de symétrie des pôles et leur forme est telle que le collecteur peut tourner dans les deux sens. Ce sont, par exemple, des blocs de cuivre ou de charbon artificiel appuyés par des lames de ressort et dans lesquels le frottement du collecteur creuse une cuvette. Il va sans dire que ce procédé suscite plus d'étincelles que le système ordinaire de réglage des balais à la main, et que la durée des collecteurs doit être réduite. Les étincelles éclatent particulièrement lors des variations brusques du courant, comme il s'en produit aux arrêts et aux changements de marche.

Afin de diminuer les réactions de self-induction lors d'une rupture de circuit, on a soin d'affaiblir graduellement le courant qui alimente l'électromoteur par l'insertion de résistances artificielles dans le circuit de celui-ci.

Les mêmes résistances permettent de faire varier la différence de potentiel appliquée à l'électromoteur pour modifier le couple de la machine électrique, ainsi que d'éviter la production d'un courant trop intense lors du démarrage.

Au lieu de recourir à un rhéostat qui détermine une perte d'énergie en chaleur parfois assez considérable, il est possible d'agir sur l'excitation des inducteurs. M. Reckenzaun divise les bobines magnétisantes en 3 sections pouvant s'associer en série ou en dérivation de manière à modifier à volonté le couple moteur. On a vu, au § 574, la combinaison suggérée par M. Sprague pour arriver au même but. Par cette disposition, on empêche également que le courant atteigne, au démarrage, une intensité dangereuse pour l'induit.

Les moteurs des tramways étant soumis à des vibrations et des chocs violents, il convient de donner aux diverses pièces une solidité exceptionnelle. L'armature doit être parfaitement centrée pour éviter les secousses dues à la force centrifuge ; on vérifie le centrage

en disposant l'arbre entre pointes et en observant s'il s'arrête dans une position invariable. Les connexions des fils induits avec le collecteur se feront par des tiges solides, car elles sont très exposées à se briser lors des arrêts brusques. Le noyau en fer de l'armature doit être recouvert de plusieurs couches de toile, afin d'éviter les courts-circuits dans les sections de l'induit et l'on veillera tout spécialement à l'isolement de celles-ci. On se trouvera bien, pour la bonne conservation des isolants de la machine, comme aussi pour l'isolement des disques de fer de l'armature entr'eux, de l'emploi du vernis copal, qui commence à se répandre dans la construction des dynamos. Les disques sont recouverts de ce vernis et séchés pendant quelques heures à l'étuve, à 100°. De même, le coton et la toile qui protègent les fils et les noyaux sont imbibés de ce vernis; la machine terminée est séchée tout entière à l'étuve.

L'espace disponible sous les voitures de tramway n'est guère que de 60 à 70 cm, de sorte que le plus grand diamètre qu'on peut donner à l'armature ne dépasse pas 50 cm. On verra comment la firme Thomson-Houston protège l'induit contre les boues de la voie par la forme donnée aux inducteurs. Il conviendra d'éviter les pôles saillants qui pourraient attirer les clous ou autres objets de fer tombés sur la voie.

On emploiera toutes les dispositions propres à faciliter l'enroulement et les réparations de l'induit qui constitue la partie la plus délicate et la plus sujette à dérangements de l'appareil. Généralement, on adopte l'induit à anneau qui se prête à des vitesses angulaires plus faibles que l'induit à tambour et dont les sections se remplacent plus facilement.

Pour empêcher que l'induit ne se décentre, on emploie des coussinets très durs en bronze phosphoreux ou en bronze d'aluminium. Les tourillons peuvent être munis de canons clavetés susceptibles d'être remplacés.

En général, on recherche pour la traction des véhicules des moteurs légers en même temps que robustes, afin d'accroître le moins possible le poids mort. Il n'est fait d'exception que pour le cas où le moteur est placé sur un véhicule remorqueur; un certain poids est alors nécessaire pour assurer l'adhérence des roues motrices sur la voie.

L'enroulement en série des inducteurs est le plus usité dans les moteurs des voitures automobiles. C'est le moins coûteux et aussi celui qui donne l'effort maximum au démarrage. Comme un agent est préposé à la manœuvre, il n'y a pas à craindre que le moteur s'emporte lorsque la résistance à la traction diminue.

L'enroulement en dérivation pourrait aussi être employé; il a l'avantage de fournir une vitesse sensiblement constante, lorsque la différence de potentiel est invariable. De plus, il se prête à un réglage économique du couple moteur par des résistances intercalées dans le circuit des électro-aimants. Mais l'affaiblissement des ampères-tours inducteurs résultant d'un tel réglage, opposé au renforcement des ampères-tours induits, provoque de grands déplacements de la ligne neutre; d'où résulte l'impossibilité de conserver un calage des balais constant pendant la marche. En outre, comme on utilise souvent de fortes tensions électriques, le coût de l'enroulement des inducteurs serait élevé. Enfin, lorsque le véhicule est relié aux générateurs par les rails et les essieux, il se produit parfois des contacts imparfaits et des interruptions de circuit. Dans ces cas, le moteur se désamorce, la force contre-électromotrice devient nulle et, au moment de la rentrée en circuit, l'induit est parcouru par un courant capable de compromettre les conducteurs.

603. — **Modes de transmission**. — Dans les applications de la traction électrique aux tramways, les voitures sont généralement rendues automobiles; ainsi, le poids des voyageurs donne l'adhérence nécessaire aux roues motrices. Un des essieux reçoit le mouvement d'un moteur. Plus souvent, les deux essieux sont mus par un seul électromoteur ou par deux électromoteurs séparés, ce qui fournit une adhérence plus grande et permet de développer des efforts de traction suffisants pour gravir des rampes raides, comme aussi de renverser plus rapidement la marche du véhicule lorsqu'un obstacle obstrue la voie. Les grandes voitures reposent souvent sur deux *boggies* portant chacun un électromoteur. L'emploi de deux moteurs laisse une réserve en cas d'accident à l'un d'eux, mais il occasionne une dépense et un poids plus grands, ainsi qu'une diminution de rendement. Parfois, une voiture automobile entraîne avec elle une ou plusieurs voitures ordinaires.

Il est très rare qu'on emploie des remorqueurs spéciaux qui donnent lieu, comme nous le verrons, à des frais de traction élevés. Dans le but d'utiliser le matériel existant, les moteurs se placent généralement sous le plancher des voitures, entre les deux essieux ; de la sorte, il n'y a aucun espace utile perdu. L'exiguïté de cet emplacement entraîne l'emploi de dynamos à induits de faible diamètre, tournant par suite à des vitesses qui atteignent un millier de tours par minute. Or, comme les essieux des tramways urbains ne font guère plus de 100 à 120 tours, on a d'abord employé des systèmes de transmission avec axe intermédiaire, dits *à double réduction* de vitesse, pour obtenir la vitesse angulaire convenable ; ces organes de renvoi sont plus ou moins délicats et leurs frottements absorbent une partie de l'énergie disponible.

Pour les éviter, on a agrandi le diamètre des induits de manière à les faire tourner à 400 ou 500 tours seulement. On a ainsi réalisé l'attaque de l'essieu par un seul pignon, système dit à *simple réduction*.

Enfin, lorsque la vitesse moyenne des voitures peut atteindre 15 à 18 km à l'heure, on est arrivé à placer l'induit directement sur l'essieu. Ce système, dit *sans réduction* (gearless), entraîne, même avec des machines multipolaires, des vitesses d'induit ne dépassant guère 3 m par seconde à la périphérie. De telles machines ont un rendement réduit, mais la suppression d'un engrenage, qui absorbe de l'énergie et exige un entretien spécial, constitue une sérieuse compensation.

Sur chacune des plates-formes d'une voiture automobile, il y a un inverseur de courant et un levier de manœuvre du frein. On munit ces appareils de clefs à enlever ou de pièces de sureté, pour éviter que les voyageurs ne fassent de fausses manœuvres sur la plate-forme d'arrière. Sous la voiture se placent éventuellement le rhéostat, les parafoudres et les coupe-circuits.

En ce qui concerne le mode de fixation du moteur, deux systèmes sont en usage. Le premier et le plus rationnel consiste à séparer complètement la construction de la caisse de la voiture de celle du truc destiné à la supporter et à fixer à ce dernier le moteur et les transmissions. La caisse s'attache alors sur le truc par un intermédiaire élastique, tel que des ressorts en acier ou en caoutchouc. De

cette manière, les trépidations du moteur ne se font pas sentir dans la voiture. En outre, un accident à l'appareil électrique ne nécessite que le remplacement du train des roues et non celui de la voiture entière ; il suffit de soulever la caisse du véhicule rentré au dépôt pour substituer au truc détérioré un truc de rechange. Enfin, le même mécanisme sert l'hiver pour les caisses fermées et l'été pour les caisses ouvertes. Dans le second système, qui doit être suivi forcément dans le cas où l'on utilise un matériel existant dans lequel la caisse fait corps avec le châssis des roues, le moteur se fixe sous le plancher à la caisse même du véhicule. Ces deux systèmes diffèrent non seulement au point de vue des conditions de réparation, mais aussi en ce qui concerne les modes de transmission à employer entre l'arbre de la dynamo, l'arbre intermédiaire et l'essieu moteur. Dans le premier cas, on peut faire usage d'intermédiaires rigides ; dans le second, on doit recourir à des intermédiaires flexibles, qui permettent aux organes transmetteurs de suivre les oscillations provenant du balancement de la caisse sur les ressorts qui la supportent.

604. — **Systèmes à double réduction de vitesse.** — Comme intermédiaire élastique, M. Siemens emploie des ressorts à boudin sans fin, passant sur des poulies à gorges, très larges, montées sur les axes. Grâce à l'adhérence des boudins, ce système permet de donner des diamètres très inégaux aux poulies et de rapprocher beaucoup celles-ci ; mais il ne peut être employé sur les rampes accentuées où les efforts à transmettre sont considérables.

Le plus souvent lorsque le moteur est fixé à la caisse de la voiture, il attaque un axe intermédiaire à l'aide d'un pignon engrenant avec une roue dentée. De cet axe à l'essieu, le mouvement est transmis à l'aide d'une chaîne sans fin passant sur des roues dentées de diamètres inégaux.

La fig. 360 représente un maillon de la chaîne en acier de M. Renold. Les surfaces de contact entre les maillons et les dents des pignons sont très étendues. Une chaîne semblable a fonctionné pendant deux ans, sans traces d'usure, sur une voiture de tramway où elle avait à supporter un effort normal de 640 kg. Son poids était de 12,70 kg par mètre ; sa résistance à la rupture de 14 tonnes, soit 20 fois l'effort normal.

Les intermédiaires rigides les plus employés sont les engrenages. On adopte fréquemment les rapports de vitesse suivants entre l'essieu, l'arbre intermédiaire et l'arbre moteur, 1 : 3 : 12. Vu le faible diamètre des roues dentées, le pignon du moteur est très restreint et subit une usure rapide qui engendre des chocs et un bruit désagréables. Pour diminuer le bruit, M. Westinghouse enferme les roues dans une caisse pleine d'huile. On peut aussi

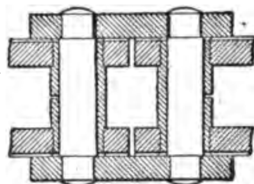


Fig. 360.

constituer les roues par une matière telle que le bois, la fibre vulcanisée ou le cuir brut soutenue par des joues métalliques.

Par suite de la fatigue considérable des moteurs et des transmissions des voitures de tramway, on estime aux États-Unis que les frais d'entretien de ces appareils représentent une fois et demie le prix du charbon brûlé à la station génératrice.

Lors de l'emploi d'intermédiaires rigides, le moteur doit être pourvu d'une suspension flexible pour éviter les chocs trop brusques. Dans ce but, la carcasse est portée, d'une part, par un coussinet appuyant sur l'essieu, d'autre part, par un ressort fixé au truc. Au moment du démarrage ou de l'arrêt, ce ressort se tend ou se comprime, ce qui donne de la douceur à la transmission.

La fig. 361 représente le truc de la voiture Thomson-Houston. Les deux essieux sont attaqués séparément par des moteurs P, P, associés en quantité. Le cadre qui sert d'appui aux traverses soutenant les moteurs porte également des chasse-corps en forme de coins. En B se placent des brosses verticales en fils d'acier glissant dans des rainures et appuyant par leur poids sur les rails, de manière à nettoyer ceux-ci. Les tringles L servent à la manœuvre des freins. La fig. 362 montre les détails de l'un des moteurs dont l'excitation s'effectue en série. Le pignon de l'arbre moteur est formé de rondelles d'acier alternant avec des rondelles de cuir non tanné,

en vue de diminuer la sonorité des engrenages. La roue dentée intermédiaire est en fonte et tourne sur un arbre dont les extré-

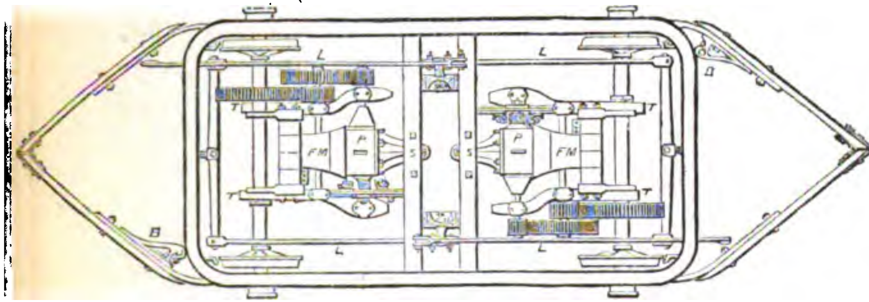


Fig. 361.

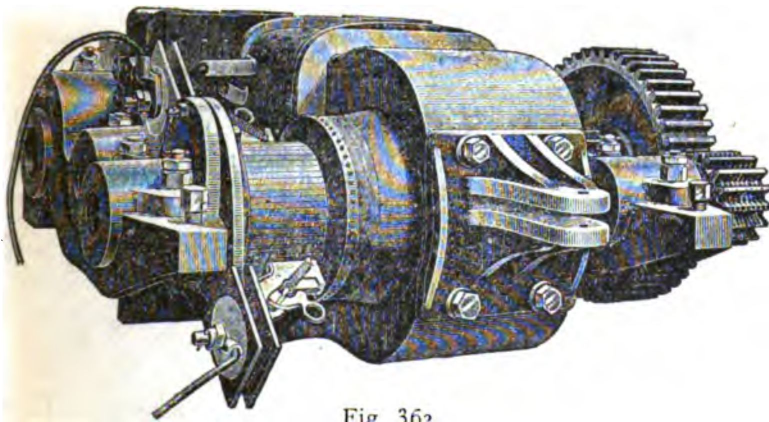


Fig. 362.

mités reposent dans des coussinets fixés aux flasques du bâti même du moteur. On assure ainsi le parallélisme des axes. Les engrenages réduisent la vitesse de la machine dans le rapport de 13 à 1.

Le bâti qui porte l'arbre du moteur et l'arbre intermédiaire est

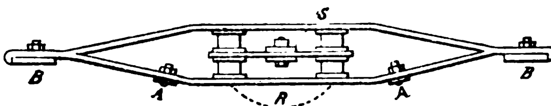



Fig. 363.

fondu d'une seule pièce. Il est supporté, d'un côté, par l'essieu, de l'autre, par quatre ressorts en caoutchouc entre deux traverses A disposées entre les essieux, fig. 363. On ménage ainsi une certaine élasticité dans la transmission, afin que les variations brusques de l'effort résistant ou de l'effort moteur ne déterminent pas le bris des dents.

605. — **Systèmes à simple réduction de vitesse.** — On a obtenu la simple réduction de vitesse avec des moteurs tournant à 1 000 tours grâce à l'emploi de la vis sans fin et de la roue héliçoïdale. M. Reckenzaun est parvenu, avec une vis en acier poli à 3 filets et une roue en bronze phosphoreux baignant par le bas dans une cuvette remplie d'huile, à atteindre un rendement de 85 à 90 pour 100 pour cette transmission.

Néanmoins on préfère réduire la vitesse du moteur à 400 ou 500 tours et faire usage d'engrenages ordinaires.

Nous empruntons à une intéressante communication, publiée par M. Dierman dans le n° de février-avril 1892 du *Bull. de l'Assoc. des Ing. sortis de l'Institut Montefiore*, les détails suivants sur les nouveaux moteurs américains.

Le moteur Thomson-Houston, fig. 364, possède un induit à anneau. La carcasse en fer forgé porte les paliers de l'armature. Elle repose, d'une part, par des coussinets, sur des portées tournées sur l'essieu et, d'autre part, sur une traverse du châssis par l'intermédiaire de tampons en caoutchouc.

On doit également à la firme Thomson-Houston un moteur de tramway complètement enfermé dans une caisse en fonte faisant partie des inducteurs, ainsi que le montre la fig. 365, où l'on voit l'induit découvert par une coupe. Une seule bobine excite les inducteurs, ce qui détermine un effort magnétique qui soulage les coussinets. L'anneau est denté. A l'arrière de la figure on voit le réservoir d'huile enfermant les roues d'engrenage. Ce réservoir est en cuivre, afin d'éviter les dérivations magnétiques. Le pignon est en bronze et la roue en fonte.

La Compagnie internationale d'Électricité de Liége construit égalément un moteur waterproof, dans lequel les inducteurs en acier coulé sont symétriquement excités par deux bobines embrassant

partiellement l'anneau. Ce dernier est très robuste. Les fils induits sont enroulés dans des cavités longitudinales percées dans les disques de fer du noyau et communiquant avec l'extérieur par des

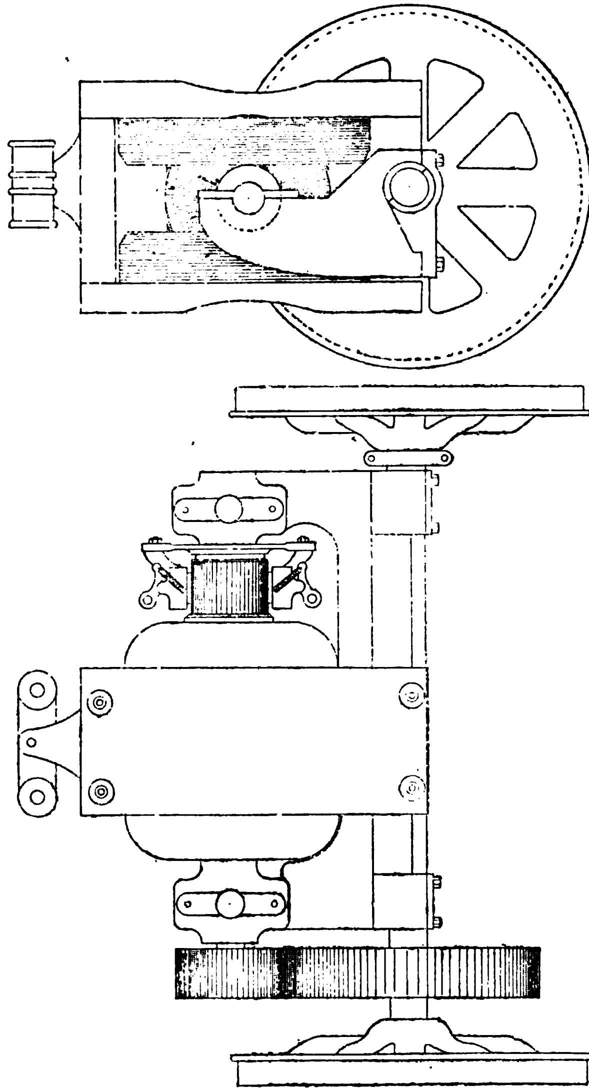


Fig. 364.

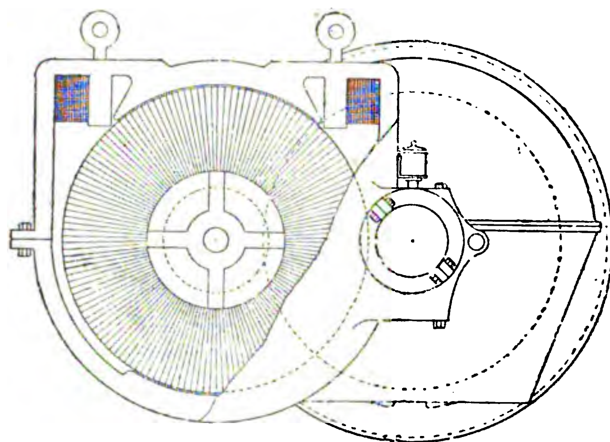


Fig. 365.

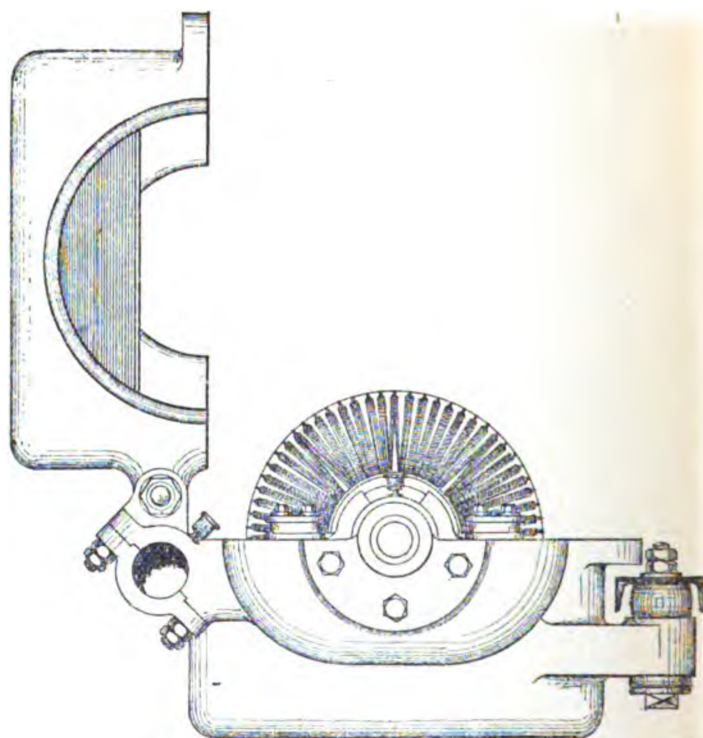


Fig. 366.

rainures étroites à travers lesquelles on passe les fils. La figure 366 montre comment on ouvre la caisse des inducteurs pour dégager l'induit.

Le moteur Sprague-Edison à inducteurs tétrapolaires, fig. 367, porte un induit à anneau denté. Les deux pièces de fonte constituant la carcasse sont munies des supports de l'arbre, du coussinet entou-

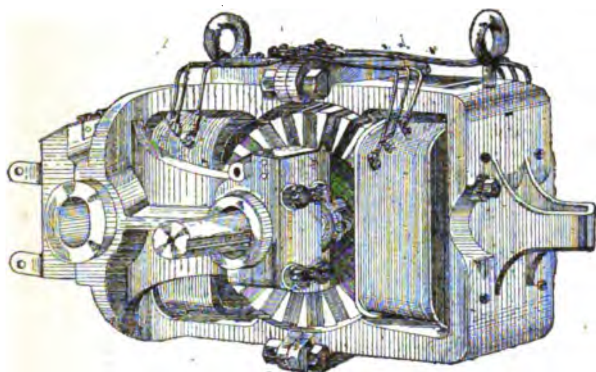


Fig. 367.

rant l'essieu et de l'étrier d'attache à la traverse du châssis. On voit, sur la figure, des fils de connexion multiples aboutissant aux inducteurs. Ils servent au dispositif Sprague pour le réglage de la vitesse. Un rhéostat en fer peu important sert au démarrage.

**606. — Systèmes sans réduction de vitesse.** — La suppression des réductions de vitesse a été réalisée aux États-Unis entr'autres par M. Short. L'armature ne peut pas être fixée d'une manière rigide sur l'essieu, comme on l'a fait à tort dans les premières locomotives du City and South of London Railway, car les vibrations désorganisent rapidement les machines.

La fig. 368 montre le dispositif adopté dans le système Short. Le moteur repose sur deux traverses du truc par des tampons en caoutchouc. L'axe de l'induit, porté par des paliers fixés à la carcasse, est creux, ainsi que le montre la coupe. Il est traversé par l'essieu et relié aux roues par des ressorts qui transmettent l'effort en adoucissant les chocs.

L'induit, formé par un anneau denté de section carrée, tourne

entre des pièces polaires disposées en regard. Le noyau de l'armature est constitué par un ruban de fer enroulé et fraisé latéralement pour recevoir les sections de l'induit. La disposition latérale des

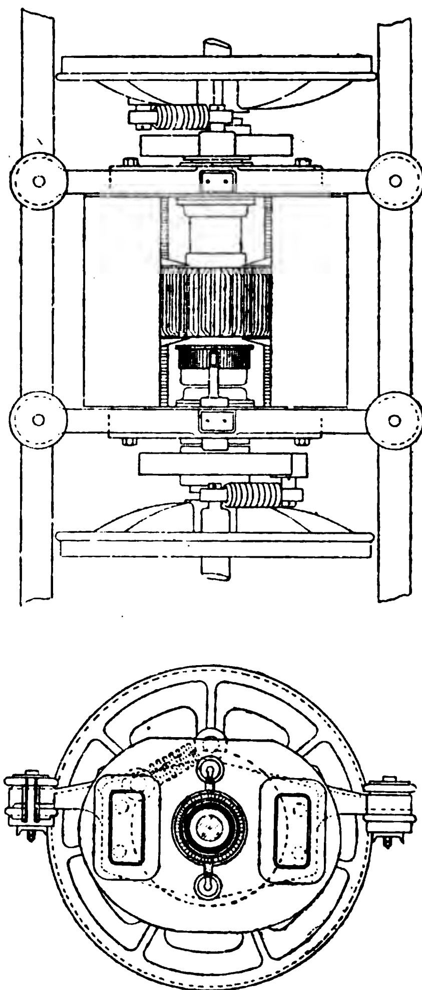


Fig. 368.

pôles évite le frottement contre l'armature en cas d'usure des paliers. Elle permet, en outre, d'agrandir le diamètre de l'anneau et de réduire la vitesse angulaire.

Dans tous ces moteurs la lubrification se fait par des graisseurs à mèche ou à graisse solide. Les graisseurs à bagues cessent parfois de fonctionner par suite de l'arrêt des bagues sous l'influence des secousses de la voiture.

**607. — Systèmes de traction.** — La traction électrique peut se faire suivant deux modes différents. Dans le premier, le courant qui alimente l'électromoteur est produit par des génératrices installées à poste fixe dans une station susceptible d'alimenter simultanément un réseau servant à l'éclairage, et le courant des dynamos est amené aux véhicules par des conducteurs aériens ou souterrains et des contacts glissants. Cette disposition ne diffère d'une transmission électrique ordinaire qu'en ce que l'électromoteur est mobile. Dans le second système, le véhicule porte lui-même un générateur électrique qui, à défaut de piles primaires économiques, est constitué par des piles secondaires. Ce dernier système est le seul possible lorsque les véhicules ne roulent pas sur une voie ferrée dont le parcours est invariable.

## TRACTION ÉLECTRIQUE AVEC GÉNÉRATEURS FIXES.

**608. — Modes de liaison entre les véhicules et les générateurs.** — Des méthodes très variées sont en usage pour conduire le courant des générateurs fixes aux électromoteurs circulant sur une voie de chemin de fer. Le courant peut être amené par des conducteurs suspendus au dessus de la voie, placés au niveau de celle-ci ou enfouis dans un canal souterrain. L'électromoteur se raccorde aux conducteurs par des frotteurs entraînés dans le mouvement du véhicule. Fréquemment, les rails servent de conducteurs de retour, la liaison entre les rails et le moteur ayant lieu par l'intermédiaire des essieux et des roues du véhicule. Le raccordement entre les diverses voitures automobiles circulant sur une voie ferrée et la station se fait par la disposition en dérivation ; rarement on utilise la disposition en série.

Dans le premier cas, on fait généralement usage de dynamos compound à la station génératrice et les conducteurs sont

maintenus à une différence de potentiel aussi constante que possible. Lorsque la ligne est longue, on régularise la différence de potentiel dans le conducteur de prise de courant par des feeders dans lesquels la chute de tension est uniforme. Ces feeders raccordent les générateurs à des points convenablement choisis sur la ligne. Afin d'éviter qu'un court-circuit dans une des voitures circulant sur la voie n'amène un arrêt général du service, on fractionne souvent le conducteur de prise de courant en tronçons isolés les uns des autres et raccordés chacun à un feeder qui est protégé à la station par un fil fusible. Si un court-circuit se produit, le tronçon correspondant est hors de service, mais les autres tronçons continuent à amener le courant aux voitures.

Dans les lignes à grand trafic ce système est inapplicable, parce que la faible section admissible pour le conducteur de prise de courant obligerait à multiplier considérablement les feeders. On soulage alors ce conducteur par un câble aérien ou souterrain disposé parallèlement à la voie et alimenté de distance en distance par des feeders. Les tronçons isolés du conducteur de prise de courant sont, dans ce cas, raccordés au câble distributeur par l'intermédiaire de fils fusibles qui isolent les tronçons en cas de courts-circuits.

Le groupement des électromoteurs en série suppose qu'ils sont enroulés pour fonctionner sous un courant maintenu constant par les générateurs.

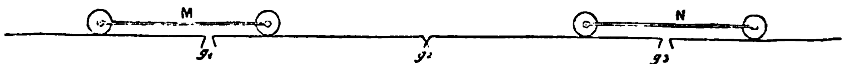



Fig. 369.

La fig. 369 montre le principe de cette combinaison. L'un des conducteurs est interrompu par des commutateurs $g_1$, $g_2$, $g_3$ qui normalement sont fermés. Lorsqu'un véhicule M s'engage sur la voie, il ouvre l'interrupteur $g_1$ et oblige le courant à traverser l'électromoteur, puis referme l'interrupteur derrière lui. Nous étudierons plus loin les détails d'une application de la distribution en série qui, jusqu'à présent, a eu beaucoup moins de succès que celle en dérivation, laquelle a l'avantage d'assurer l'indépendance des

divers véhicules. Par contre, la distribution en série permet de réduire l'intensité du courant dans les conducteurs, ainsi que la tension aux bornes des électromoteurs.

## EMPLOI DE CONDUCTEURS POSÉS AU NIVEAU DE LA VOIE.

**609. — Chemin de fer secondaire de Bessbrook à Newry.** — Une application intéressante des conducteurs posés au niveau de la voie a été faite par M. Hopkinson, sur un chemin de fer à petite section reliant Bessbrook à Newry, en Angleterre, en vue d'utiliser la puissance d'une chute d'eau située dans la première de ces localités. Celles-ci sont distantes de 4 875 m. La voie qui les réunit comporte des courbes de 16,70 m de rayon et des rampes de 2 pour 100. Les trains comprennent deux voitures à voyageurs et un certain nombre de wagons à marchandises. A la station génératrice, deux dynamos en dérivation, du système Édison-Hopkinson, sont activées par une turbine de 60 chevaux et développent chacune 250 volts et 60 ampères, avec un rendement commercial de 90,4 pour cent.

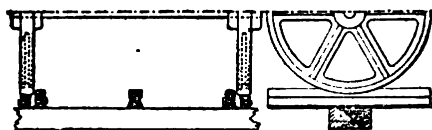


Fig. 370.

Le circuit est formé par les rails et par un conducteur central en acier posé sur des tasseaux en bois imprégné à chaud de paraffine. Ces tasseaux sont fixés sur les traverses de la voie. L'acier du conducteur renferme 0,09 pour 100 de carbone, 0,02 pour 100 de silicium et 0,63 pour 100 de manganèse. La résistance spécifique est de 12,1 microhms-cm. A conductibilité égale, il coûte les deux tiers du cuivre et présente l'avantage de ne pas tenter les voleurs. La conductibilité aux éclissages des rails et du conducteur central est assurée par des petits raccords flexibles en cuivre. La résistance

d'isolement de la voie est de 600 ohms par kilomètre par les plus mauvais temps, ce qui, à la tension de 250 volts, ne représente qu'une perte de 0,15 cheval par kilomètre.

Ainsi qu'on le voit sur la figure, les roues ont des bandages plats et elles sont guidées par des contre-rails intérieurs. Cette disposition permet de faire rouler les petits wagons sur les routes ordinaires et elle évite les inconvénients du transbordement des marchandises à l'arrivée. La résistance à la traction de ce système n'est pas plus élevée que celle occasionnée par les roues à boudin.

L'électromoteur est placé à l'avant d'une des voitures à voyageurs, dans un compartiment spécial. C'est une dynamo Édison-Hopkinson excitée en série et transmettant son mouvement, par un pignon héliçoïdal en acier, à un arbre intermédiaire, lequel attaque, par une chaîne Renold, § 604, l'un des essieux d'un truc dont les deux essieux sont couplés par une bielle.

Les poids de la voiture automobile se répartissent comme suit :

| | | |
|---|---|---|
| Caisse . . . . . . . . . . . . . . . . . | tonnes | 3,30 |
| Truc moteur . . . . . . . . . . . . . | » | 1,90 |
| Truc d'arrière . . . . . . . . . . . . . | » | 1,00 |
| Dynamo et transmission. . . . . . . . . . . | » | 2,05 |
| Total : | tonnes | 8,25 |

La charge remorquée est de 30 tonnes, à la vitesse de 11 kilomètres à l'heure sur une rampe de 2 pour 100. La réceptrice peut développer 20 chevaux avec un rendement industriel de 90,7 pour cent.

Le courant a accès, d'une part, par les rails, les roues et les essieux, d'autre part, par deux frotteurs en contact avec le conducteur central et fixés aux extrémités de la voiture servant de remorqueur. Un rhéostat intercalé à la suite de la dynamo permet de varier l'intensité du courant.

Aux passages à niveau, le conducteur central est interrompu et le circuit électrique est complété par un conducteur souterrain; mais la voiture reste reliée aux générateurs soit par le balai d'avant, soit par le balai d'arrière.

L'effort de traction varie de 12 à 17 kilogrammes par tonne selon les rampes.

Des expériences précises ont permis de constater que le *rende-*

*ment électrique* total de cette transmission est de 71,4 pour cent, les pertes étant les suivantes :

| | |
|---|---|
| Aux génératrices . . . . . . . . . . . . | 8,6 pour 100 |
| Aux isolants. . . . . . . . . . . . . . | 5,7 » |
| Aux réceptrices . . . . . . . . . . . . | 7,7 » |
| Par la résistance de la ligne . . . . . . . | 6,6 » |
| Total : | 28,6 pour 100. |

Le *rendement commercial*, de la chute d'eau aux essieux moteurs, y comprises les pertes dans les turbines, transmissions, dynamos, est de 40 pour cent, alors que les locomotives n'utilisent que 3,5 pour cent de l'énergie disponible dans le combustible qu'elles consomment.

## EMPLOI DE CONDUCTEURS AÉRIENS.

**610. — Tramway de Francfort à Offenbach.** — Dans le tramway établi par MM. Siemens et Halske, au commencement de l'année 1884, entre Francfort et Offenbach (6 kilomètres), le

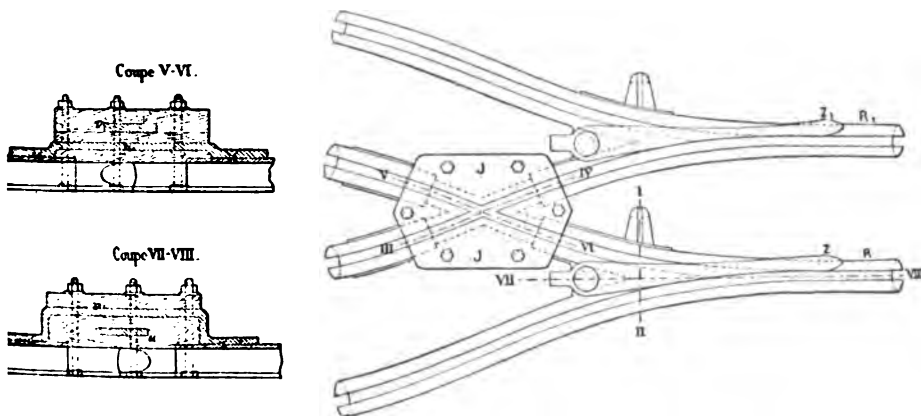



Fig. 371, 372 et 373.

courant arrive à la voiture par deux conducteurs spéciaux, fig. 371 à 373, constitués par des tubes fendus R, $R_1$ et supportés par des câbles formés de fils d'acier et de cuivre. Ces câbles, qui servent à

la fois de supports et de conducteurs, sont fixés à des isolateurs que portent des poteaux plantés le long de la voie. Dans le conducteur tubulaire glisse une navette comprenant quatre frotteurs en cuivre, ayant la forme d'olives et reliés entr'eux par des câbles souples. Ces frotteurs sont en deux parties séparées par un ressort à boudin, disposition qui a pour but d'assurer un bon contact électrique avec le tube, même en cas d'usure des olives.

Les deux olives extrêmes portent des projections qui traversent la fente du tube et sont reliées extérieurement par une traverse horizontale. Elles communiquent électriquement, par l'intermédiaire de conducteurs flexibles, avec la borne à laquelle est attaché le câble métallique qui amène le courant à l'électromoteur de la voiture. C'est aussi au moyen de ce câble que le véhicule entraîne les frotteurs.

La ligne est à simple voie, mais elle présente des voies d'évitement, à l'entrée desquelles il est nécessaire d'employer des dispositions spéciales. Aux points de croisement des deux conducteurs tubulaires, les quatre tronçons qui aboutissent au sommet de l'angle sont arrêtés à une plaque en bois J J, sous laquelle glisse la navette pour passer d'un tronçon au tronçon opposé. Les dimensions de cette plaque sont telles que, lorsque le dernier frotteur d'une navette sort de l'un des tubes, le premier est déjà engagé dans la section correspondante; ainsi l'on évite le déraillement du chariot. Aux points de bifurcation, des aiguilles $z$, $z_1$, maintenues par des ressorts, forcent les chariots à s'engager dans les tubes correspondant à la voie que doit prendre le véhicule.

L'usine fournissant la puissance motrice est située à peu près au milieu de la ligne. Elle comporte deux machines à vapeur d'une puissance totale de 140 chevaux, qui activent, à la vitesse de 600 tours par minute, 4 dynamos compound associées en dérivation et développant une différence de potentiel de 600 volts. Le nombre des dynamos mises en activité varie avec le nombre des véhicules circulant sur la voie; deux dynamos suffisent pour fournir le courant à quatre voitures, tandis que trois dynamos sont nécessaires lorsqu'il y a six voitures en route. Les véhicules pèsent 4 tonnes environ et peuvent porter 22 personnes.

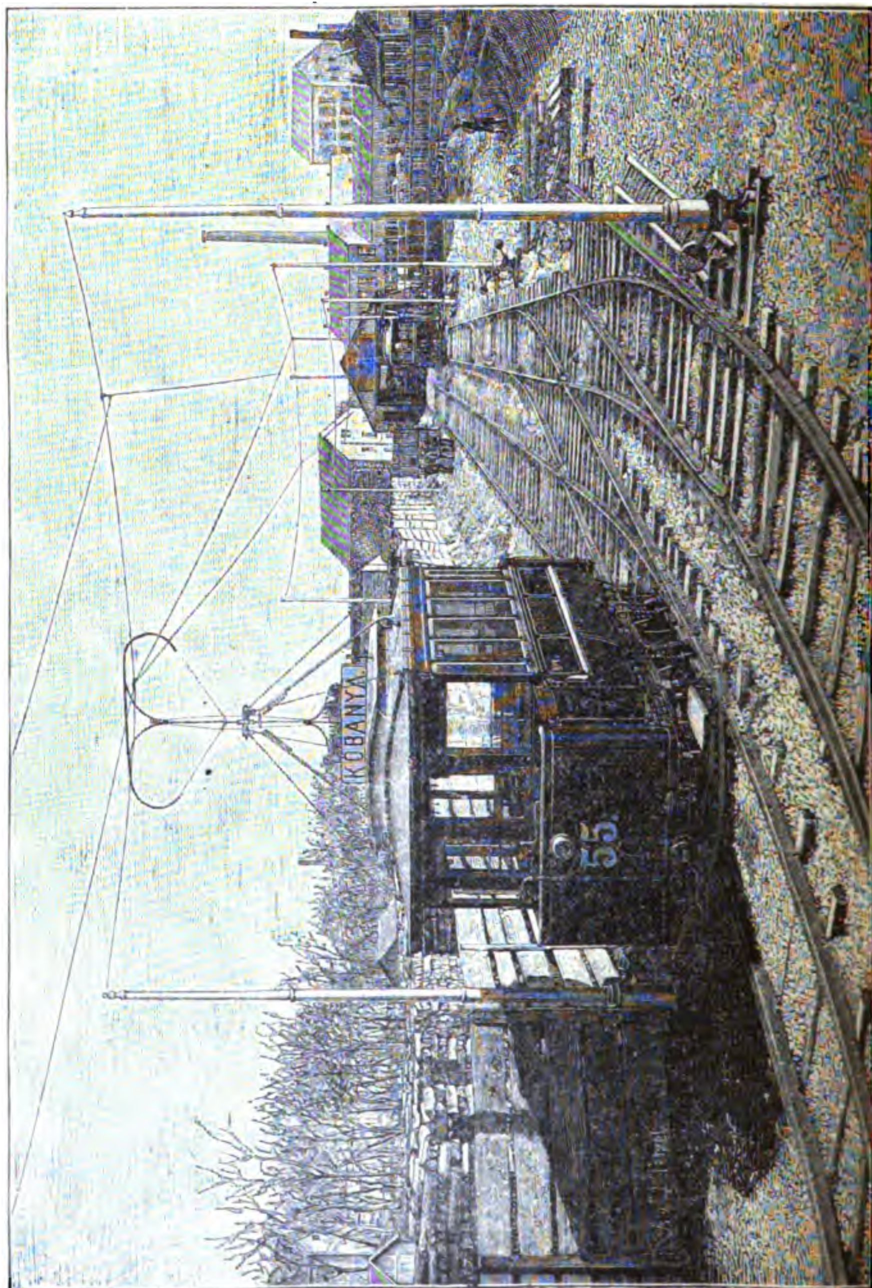
Le rendement industriel de la transmission électrique varie de 50 à 60 pour cent, suivant la position des véhicules sur la ligne.

**611. — Autre prise de courant aérienne de MM. Siemens et Halske.** — Le système de prise de courant précédent a l'inconvénient d'exercer sur les conducteurs une traction qui ajoute son effet au poids de ces derniers et oblige à employer des supports résistants et rapprochés. Pour alléger les lignes, MM. Siemens et Halske ont adopté un autre système dans lequel le conducteur de prise de courant est un fil suspendu au-dessus de la chaussée par des fils transversaux minces attachés à des poteaux par l'intermédiaire d'isolateurs, fig. 374. Sous le conducteur de prise de courant glisse un cadre métallique élastique fixé à la toiture du véhicule par une structure légère formée de tiges contreventées par des fils. Le retour du courant s'opère par les essieux et les rails. Ce système évite certaines complications qu'entraîne l'emploi des galets roulants dont il est question ci-après. Le fil de prise de courant est en fer, ce qui rend son usure de peu d'importance.

**612. — Tramways à prise de courant aérienne par galets roulants (trolleys). Système Van Depoele.** — Les américains font usage, pour la prise du courant, d'un galet mobile ou *trolley* roulant à la partie inférieure d'un conducteur, appelé fil de trolley, et porté par une longue tige rigide articulée au sommet de la voiture. Le conducteur est en bronze ou en cuivre durci. Il a 5 à 10 mm de diamètre. Lorsqu'il doit être attaché directement aux isolateurs, ceux-ci sont soutenus par le col, et le fil de trolley est suspendu à la ferrure centrale.

Les bifurcations et les croisements demandent des dispositions qui sont fort simples dans le cas d'une ligne à un seul fil et à retour par la terre. Considérons un croisement. Les quatre fils, qui sont alors reliés au même pôle du générateur, se fixent à une plaque horizontale attachée à un poteau par la partie supérieure. A la partie inférieure de la plaque, les conducteurs sont prolongés par des saillies convergentes venues de fonte avec la plaque. Ces saillies vont en s'amincissant de manière à arriver au niveau de la plaque au point de concours. De cette manière, un galet engagé sous l'un des conducteurs passe sous la plaque et prend le conducteur situé dans le prolongement du premier, en évitant les conducteurs de l'autre ligne.

Si la ligne aérienne est à deux conducteurs, sans retour


KOBANYA
55

par la terre, la disposition est plus compliquée, attendu qu'il faut ménager des isolants pour que les conducteurs reliés aux pôles de noms contraires des générateurs ne viennent pas en contact.

Les poteaux employés pour soutenir les fils de prise de courant et les feeders ont 6 à 7 m de hauteur et sont distants d'une cinquantaine de mètres. On emploie généralement dans les villes des poteaux métalliques auxquels il est facile de donner une forme gracieuse. Dans les lignes à double voie, les poteaux se placent au milieu de l'entrevoie et portent deux potences latérales plus ou moins ornées qui soutiennent les conducteurs de prise de courant. Les feeders reposent directement sur les poteaux. Dans les lignes à simple voie longeant les trottoirs, les poteaux sont à simple potence. Le plus souvent on soutient les fils de prise de courant par des fils d'acier transversaux s'attachant, aux deux côtés de la rue, par l'intermédiaire d'isolateurs à des maisons ou à des poteaux placés sur les trottoirs.

Voici quelques dispositions adoptées pour la prise de courant.

Les fig. 375, 376 et 377 montrent le galet double de M. Van Depoele, destiné à une ligne à deux conducteurs, sans retour par la

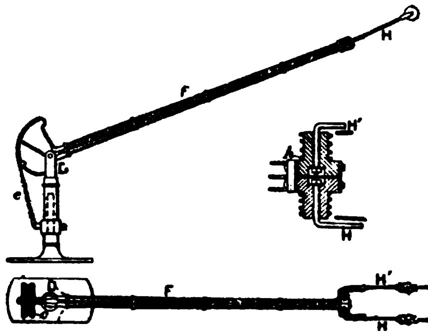



Fig. 375, 376 et 377.

terre. Sur le toit de la voiture se dresse un support portant un long bras F formé de lames d'acier et ayant 5 à 10 m de longueur. Ce bras est susceptible de se déplacer dans le sens latéral et dans le sens vertical, de manière à suivre les ondulations de la ligne aérienne.

Un ressort *e* sollicite l'extrémité du bras vers le haut. A cette extrémité se trouvent deux poulies à gorge qui roulent à la partie inférieure des fils de trolley. Les deux branches qui portent ces poulies communiquent séparément avec les deux bornes des moteurs. Des ressorts *h* maintiennent séparément les deux poulies contre les conducteurs. Afin d'alléger l'appareil, on a employé récemment des galets en aluminium.

**613. — Voiture Thomson-Houston.** — La fig. 378 montre un

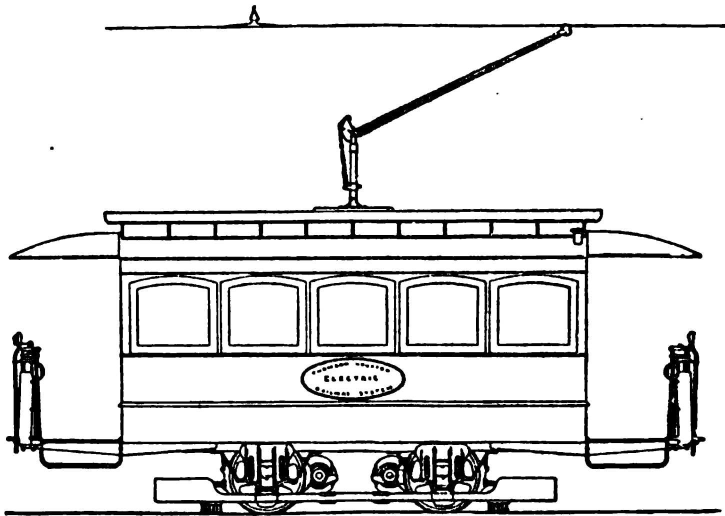


Fig. 378.

système analogue appliqué au cas où l'on n'emploie qu'un seul conducteur spécial et où le retour a lieu par les rails.

Il n'existe alors qu'un seul galet à l'extrémité du bras mobile. On distingue sur la figure les dispositions générales adoptées dans les voitures électriques de la Compagnie américaine Thomson-Houston et dont une vue en plan a déjà été donnée dans la fig. 361. Autour du mécanisme, on voit le chasse-corps qui porte les balais en fil d'acier destinés au nettoyage des rails.

Les voitures portent deux moteurs de 7 $^1/_2$ chevaux chacun, associés en quantité. Ces moteurs, dont l'excitation est faite en

série, sont soumis à une tension de 500 volts. Le courant arrivant du galet mobile traverse un coupe-circuit fusible qui interrompt le courant lorsque celui-ci dépasse 50 ampères. Le circuit comprend également un parafoudre pour éviter que les moteurs et les appareils de réglage ne soient détériorés par des décharges atmosphériques; on emploie, dans ce but, l'appareil décrit au § 478 et destiné à empêcher la formation d'un arc permanent lors d'une décharge. Le courant traverse ensuite les armatures des moteurs, le rhéostat, l'inverseur de courant, les inducteurs et gagne la terre par l'intermédiaire des essieux, des roues et des rails.

Le rhéostat, fig. 379 et 380, mérite une mention spéciale. Il se place sous la voiture et se manœuvre des plates-formes par des cordes passant sur le tambour D. On déplace ainsi un bras portant

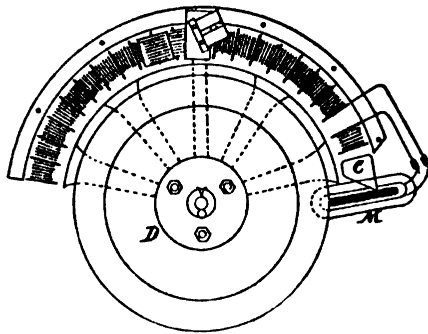



Fig. 379.

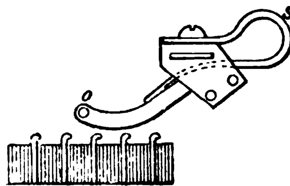



Fig. 380.

un ressort S qui appuie le frotteur O sur les blocs de contact disposés en arc de cercle. Ces blocs font saillie et sont reliés par des lames de fer repliées en zigzag et isolées par des bandes de mica.

Le bras de contact interrompt le courant lorsqu'il arrive à l'une

Un ressort *e* sollicite … nent, le courant traverse un extrémité se trouvent d… …nétique a pour effet de briser inférieure des fils de … …trémité de la pièce C, suivant poulies communiqu… …re du même inventeur. moteurs. Des ress… contre les condu… récemment des …

… 381 montre un système de prise … …rt et dans lequel le galet roulant … …le glissant sous le fil qui amène le … …a selle est garnie d'un alliage mou, … du fil. Cette garniture supporte …tres sans réfection.

… frotteur est relevé par deux ressorts … vertical, ce qui permet au frotteur … …m, en même temps qu'un déplacement …

613. — Voitur… …e **Richmond**. — M. Sprague, l'un des … …électrique aux États-Unis, a doté la ville … particulièrement intéressante au point de … …niques. La ligne, à double voie, a une



Fig. 381.

… kilomètres ; elle possède des rampes variant de … et présente des courbures dont le rayon est …ètres. Les chaussées sont mal entretenues, comme

: le cas dans beaucoup de villes américaines, et, par les temps pluie, la voie est complètement recouverte de boue. Tous ces bstacles accumulés faisaient considérer la tentative comme désespérée par les hommes compétents ; aussi le succès de l'entreprise opéra-t-il une réaction à laquelle on doit en grande partie le développement de la traction électrique aux États-Unis.

Le nombre des voitures simultanément en mouvement est d'environ 40. La station centrale, qui sert également à l'éclairage de la ville et à l'alimentation de moteurs domestiques, comprend, pour le service des tramways, trois moteurs à vapeur du système Armington, de 125 chevaux, activant 6 dynamos Edison de 40 kilowatts à 400 volts.

Le courant arrive aux électromoteurs des véhicules par des fils en bronze siliceux supportés par des potences fixées au dessus de la voie à des poteaux situés entre les deux lignes. Les fils de prise de courant communiquent avec un conducteur de gros diamètre courant à la tête des poteaux. Ce dernier est lui-même relié à la station par des feeders, dont la fonction est de maintenir une tension uniforme sur les conducteurs de distribution.

Chaque voiture porte deux électromoteurs attaquant chacun un des essieux par un train d'engrenages réduisant la vitesse de 12 à 1. Les moteurs, qui développent normalement chacun 7 $^1/_2$ chevaux, sont susceptibles de produire momentanément un effort quadruple de l'effort normal, afin de démarrer sur les rampes et les courbes de faibles rayons. Les moteurs du type décrit au § 574, fig. 343, permettent d'effectuer les variations de l'effort moteur sans rhéostat, grâce à l'enroulement spécial des inducteurs.

Le courant retourne à la station par les rails de la voie ; afin de diminuer la résistance de retour, les rails sont réunis de distance en distance aux conduites d'eau et au puits du voisinage, qui constituent de bonnes prises de terre. Les résultats de l'exploitation de Richmond ont montré une économie de 40 pour cent sur la traction par chevaux et l'électricité a permis de surmonter des difficultés que ce dernier système n'aurait pu vaincre. Ainsi, lorsque la voiture descend une pente de 0,1, il est possible, en renversant le courant dans les électromoteurs, de produire l'arrêt et la marche en arrière sur un espace égal à la moitié de la longueur du véhicule.

... système est propre à réduire très notablement

... sur les téléphones. — Dans la presque totalité ... électriques américains on fait usage de conducteurs ... dans les neuf dixièmes des installations, le retour a lieu ... La tension, généralement admise dans ces conduc... voisine de 500 volts. L'expérience semble avoir montré ... tension n'offre pas de dangers, car des milliers d'agents ... différents, appartenant aux compagnies de tramways, ... les secousses électriques qu'elle produit sans inconvénients. ... emploi de conducteurs aériens avec retour par la terre occa... des troubles dans les lignes téléphoniques à simple fil, qui ... servent également du sol pour le retour du courant. Les effets observés sont de deux espèces : il se produit des phénomènes d'induction et de dérivation. Remarquons tout d'abord que le courant qui traverse le fil du tramway est variable, par suite du déplacement même du véhicule, des démarrages et des arrêts. Si une ligne semblable est voisine d'une ligne téléphonique parallèle sur une certaine étendue, on entend par induction, dans les téléphones, des bruits accusant les variations du courant dans les électromoteurs. En second lieu, si la ligne téléphonique prend terre dans le voisinage des rails, une dérivation du courant traverse les téléphones. Le son qui en résulte peut devenir très intense au moment d'une variation brusque du courant. Ces inconvénients n'existent pas lorsqu'on emploie un double conducteur aérien pour amener le courant aux voitures; mais, comme ce système apporte une grande complication dans les croisements et expose à des courts-circuits entre les deux fils voisins, les compagnies de tramways ont beaucoup de répugnance à l'employer.

Il semble que la solution soit plutôt dans l'emploi d'un double fil pour les communications téléphoniques, système qui a beaucoup d'avantages au point de vue de l'exploitation des téléphones, car il met ceux-ci à l'abri, non seulement de l'induction et des dérivations provenant des tramways, mais aussi de l'action des fils télégraphiques et des fils à lumière, en même temps qu'il empêche les communications téléphoniques de se troubler mutuellement. C'est pourquoi le Congrès de Paris de 1889 a vivement

recommandé l'adoption du double fil dans les circuits téléphoniques. Aux États-Unis, on s'est bien trouvé également de l'emploi d'un seul fil de retour isolé, de gros diamètre, pour un faisceau de fils de téléphone. La suppression du retour par la terre empêche les dérivations, tandis que l'induction est réduite par suite de l'action différentielle exercée par le fil de tramway sur les deux conducteurs de chaque circuit téléphonique.

Il arrive parfois qu'un fil de téléphone en tombant sur un fil de tramway amène dans les récepteurs des courants susceptibles de brûler les bobines de ceux-ci. On empêche cet accident en munissant les postes téléphoniques d'un fil fusible de petit diamètre, qui peut également servir, avec le parafoudre, à soustraire les appareils aux dangers des décharges atmosphériques.

## ÉLÉMENTS D'UN PROJET DE TRACTION.

617. — **Effort de traction.** — En Europe, les voies de tramway possèdent généralement des rails à rainure et les roues des voitures sont pourvues de bandages à bourrelet. Le frottement ou glissement du bourrelet contre les parois verticales de la rainure absorbe une fraction notable de l'effort de traction. Ainsi, Tresca a constaté sur la ligne de Paris à Versailles que la résistance de traction représente 0,01 du poids du véhicule dans le cas de bandages à bourrelet, et 0,0068 seulement avec des bandages plats.

On remarquera que, comme les roues font corps avec les essieux, il faut nécessairement que, dans les courbes, l'une des roues patine, ce qui entraîne un frottement considérable, surtout dans les courbes de petits rayons (10 mètres et même moins) qu'on rencontre fréquemment sur les lignes de tramway. La même chose arrive dans une voie rectiligne lorsque l'une des roues porte sur le fond de la rainure, l'autre roue sur le bord. Afin de diminuer le frottement dans les courbes, on emploie un rail plat du côté de la convexité de la voie. Le bourrelet des roues placées de ce côté monte sur ce rail et, comme la circonférence de roulement est alors plus grande que du côté concave, il s'ensuit une diminution du patinage. On réduit encore le frottement dans les courbes en adoptant des boîtes

à graisse mobiles, permettant aux essieux de s'orienter suivant le rayon de courbure, et en rapprochant autant que possible les deux essieux d'un véhicule.

L'effort de traction varie nécessairement beaucoup avec le système de voie, le mode d'établissement de celle-ci et l'état des rails. Alors qu'en palier l'effort n'est guère que 3,5 kg par tonne sur les chemins de fer à rails Vignole, il s'élève à 12 kg dans les tramways pourvus de rails à rainure et atteint jusque 25 kg lorsque la voie est en mauvais état. L'humidité sert de lubrifiant pour les rails et l'on remarque qu'en temps de pluie l'effort de traction est réduit d'un tiers et davantage.

Dans les rampes, l'effort de traction s'accroît de la composante parallèle à la voie du poids du véhicule. En appelant $\alpha$ l'angle d'inclinaison de la voie, $\sin\alpha$ représente l'effort supplémentaire, par kilogramme, dû à la pente. Comme les valeurs de $\alpha$ sont généralement faibles, le sinus a sensiblement la même expression que la pente par mètre. Ainsi, sur une rampe de 0,04 m par mètre, l'effort de traction supplémentaire est de 0,04 kg par kilogramme.

Il résulte de ce qui précède qu'en désignant par $p$ kg le poids d'un véhicule, par $f$ l'effort de traction par kg en palier, par $i$ la pente par mètre, l'effort de traction est

$$E = p\,(f \pm i), \qquad (1)$$

le signe — se rapportant au cas d'une pente.

Le travail pour une longueur parcourue $l$ m sur une voie uniforme est

$$W = p\,l\,(f \pm i) \text{ kilogrammètres}, \qquad (2)$$

et la puissance requise, en exprimant par $v$ la vitesse en mètres par seconde,

$$P = \frac{p\,v\,(f \pm i)}{75} \text{ chevaux ou } \frac{p\,v\,(f \pm i)}{0{,}102} \text{ watts.} \qquad (3)$$

Pour éviter des mécomptes, il conviendra de prendre $f = 0{,}015$ dans les projets.

M. Reckenzaun a observé que, dans les courbes de 15 m de rayon, l'effort de traction des véhicules de tramway est doublé et qu'il est triplé dans les courbes de 10 mètres de rayon.

Au démarrage, l'effort de traction est souvent quadruplé et même quintuplé, ce qui montre l'inconvénient des arrêts sur les fortes rampes et dans les courbes de faibles rayons.

M. Reckenzaun a fait un grand nombre d'expériences sur les tramways électriques urbains. Dans ceux-ci, l'effort moteur peut se calculer d'après l'intensité du courant absorbé par la voiture, ce qui permet d'éviter des mesures dynamométriques toujours difficiles. Cet ingénieur a constaté que le courant est extrêmement variable dans les électromoteurs, par suite des arrêts et des démarrages fréquents, ainsi que des irrégularités de la voie. En représentant les intensités en ordonnées et les temps en abscisses, il a obtenu une ligne dentelée qui se confond avec l'axe des temps sur une grande partie de son développement, eu égard à la durée des arrêts et à ce fait que la voiture se meut en vertu de son inertie et du travail de la pesanteur sur une notable fraction du parcours.

L'adhérence d'un véhicule sur la voie varie du cinquième au dixième du poids porté par les roues motrices. Il en résulte que, si l'effort au démarrage est trop considérable ou si la voie est rendue glissante par la neige durcie ou le verglas, les roues patinent. On évite cet inconvénient par des projections de sable sous les roues. On a même fait des boîtes à sable qui s'ouvrent automatiquement lorsque l'effort dépasse une certaine limite.

Les voitures de tramway sont de deux types différents. Les grandes voitures à impériales, telles qu'on les emploie sur les lignes de Paris, contiennent 50 voyageurs et pèsent 7 tonnes, sans le matériel électrique, lorsqu'elles sont remplies.

Les petites voitures de nos villes contiennent de 30 à 32 places et pèsent 3 à 4 tonnes. La surcharge d'une voiture occasionnée par le matériel électrique est de 1/5 à 1/7 et de 1/2 à 1/3 lorsqu'on emploie des accumulateurs. Ces poids suffisent, en général, pour donner l'adhérence nécessaire aux roues d'une voiture automobile.

Souvent, lorsque les Compagnies de tramways se décident à essayer la traction électrique, elles demandent à employer un véhicule spécial pour le remorquage, afin de n'avoir pas à modifier leur matériel. Il est facile de montrer, par le calcul, combien cette solution est peu avantageuse, eu égard au poids qu'on doit donner au remorqueur pour assurer l'adhérence.

Soit le cas d'une voiture pesant 4 tonnes, $p = 4\,000$. Admettons que la ligne ait une rampe de 5 cm par mètre ($i = 0{,}05$), que le coefficient de traction soit $f = 0{,}012$ et le coefficient d'adhérence 0,12.

En désignant par $p'$ le poids du remorqueur, on a pour l'effort de traction total

$$E = (p + p')(f + i) = (4\,000 + p')(0{,}012 + 0{,}05).$$

Pour que le remorqueur puisse entraîner son propre poids et celui de la voiture, il faut que l'adhérence soit au moins égale à l'effort de traction. A la limite, on a donc

$$(4\,000 + p')(0{,}012 + 0{,}05) = 0{,}12\, p';$$

d'où pour le poids minimum du remorqueur $p' = 4\,280$ kg.

On voit que le poids à donner au remorqueur serait supérieur au poids du véhicule, condition tout à fait irrationnelle. Ce système n'est donc admissible que s'il y a plusieurs véhicules à remorquer. Si le nombre des voitures est faible, le mieux est de se servir d'une voiture automobile assez puissante pour entraîner plusieurs véhicules derrière elle.

On calcule également par la formule précédente la rampe maxima qu'une voiture peut gravir. Soit une voiture automobile à deux essieux moteurs, du poids de $p$ kilogrammes. En appelant $x$ le pour cent de pente maxima, on a

$$p\,(0{,}012 + 0{,}01 \times x) = 0{,}12 \times p,$$

d'où $x = 10{,}8$ pour cent.

**618. — Puissance absorbée par les tramways électriques. Choix des machines et des dynamos.** — La puissance requise par une voiture de tramway est extrêmement variable, ainsi qu'on peut s'en convaincre par les observations présentées au paragraphe précédent. M. Crosby, qui a fait de nombreuses expériences sur le courant absorbé par les électromoteurs, a reconnu que l'intensité passe continuellement d'une valeur nulle, au moment des arrêts, à une valeur atteignant de 3 et 4 fois la valeur normale, au moment des démarrages. Ainsi à Richmond, à Cleveland et à Scranton, où les vitesses moyennes sont 9,5, 14 et 9 kilomètres à l'heure, les

puissances moyennes absorbées par les voitures sont respectivement 6,5, 6,6 et 7,4 chevaux électriques, et les puissances maxima exigées dans les rampes, 25,6, 15 et 19,2 chevaux électriques. A Richmond, la mesure a été faite sur une rampe de 9 pour 100 avec une charge de 3 900 kg; à Cleveland, sur une rampe faible avec une charge de 4 450 kg, et à Scranton, sur une rampe de 7 pour 100 avec une charge de 4 000 kg.

On compte sur une dépense moyenne de 450 watts-heure par voiture-kilomètre pour une voiture chargée pesant 4 tonnes. Ce chiffre correspond à une voie de profil moyen. Les pertes d'énergie en ligne sont moyennement de 10 pour 100.

Les variations de courant étant très brusques, il ne peut être question de régler les dynamos à la main, et il convient de faire usage d'une machine génératrice compound à l'usine.

Lorsqu'un grand nombre de voitures circulent simultanément sur la ligne, il tend à se produire une certaine égalisation dans la demande d'énergie; mais, en général, le nombre des véhicules n'est pas très grand, et l'on doit prévoir une machine motrice capable de développer un effort très supérieur à l'effort normal. La machine motrice est ordinairement calculée pour développer, au besoin, une puissance triple de la puissance normale.

Les frottements des machines auront une grande influence sur le rendement de l'usine électrique. Si, par exemple, ils amènent une perte de 10 pour 100 de la puissance totale en pleine charge, ils absorberont environ 30 pour 100 à tiers de charge; d'où un résultat final médiocre.

Le meilleur résultat sera donné par des machines à haute pression et à grande vitesse, dont le coefficient de frottement peut être très restreint, par suite de la faible masse des pièces en mouvement. Le volant doit avoir une action énergique, afin de faire face aux variations brusques de l'effort résistant. On lui donne souvent un poids de moitié supérieur à celui du volant adopté dans le cas de charges constantes. La détente est calculée de manière à obtenir le minimum de consommation par cheval indiqué pour le travail normal, le moteur fonctionnant avec forte admission pour effectuer le travail maximum. Enfin, il conviendra que le régulateur règle très rapidement le degré d'admission, lors des variations de la charge.

Cette condition d'adaptation rapide au nouveau régime exclut les machines compound, dont l'élasticité est moins grande que celle des machines à un cylindre.

Un moteur du genre Corliss ne serait pas économique dans les circonstances indiquées, car une telle machine a des limites d'admission assez restreintes, et on serait amené, pour faire face à la demande maxima, à adopter de grands moteurs dont le rendement organique serait faible sous la charge normale.

Une solution préconisée par M. Van Vloten consiste à disposer, à l'usine génératrice, une batterie d'accumulateurs destinée à fournir l'énergie électrique dépassant la demande normale. Dans ce cas, les appareils producteurs de l'électricité développent une puissance constante et les accumulateurs absorbent l'excès d'énergie fourni par les machines ou suppléent à l'insuffisance de celles-ci. Cet arrangement, qui assure un excellent rendement aux appareils générateurs, entraîne, par contre, une dépense d'immobilisation plus forte que le système d'alimentation directe.

Les sociétés américaines emploient d'ordinaire des voitures automobiles capables de remorquer une ou deux voitures ordinaires et pourvues de deux moteurs attaquant chacun un essieu et pouvant développer une puissance de 25 à 30 chevaux. Ce système utilisant l'adhérence des deux essieux de la voiture automobile permet de gravir de fortes rampes et d'arrêter rapidement le véhicule, mais il entraîne une transmission double dont les organes absorbent une notable fraction de l'énergie disponible. Il semble résulter des expériences de M. I. Hale que, sur les lignes à profil peu incliné, il est préférable de faire usage de voitures à un seul moteur, qui sont plus légères et donnent un meilleur rendement. Pour les voies à profil accidenté, où l'on emploie deux moteurs, il serait désirable de pouvoir débrayer l'une des transmissions lorsque les rampes sont faibles. M. Reckenzaun a suggéré l'idée d'accoupler les moteurs en série dans les fortes rampes où la vitesse est minime, afin de ne pas avoir à faire usage de rhéostats pour réduire le courant. Cette disposition exige un commutateur supplémentaire permettant de réunir les moteurs en quantité ou en tension suivant les besoins.

Les électromoteurs sont calculés de manière à fournir le rende-

ment maximum sous la charge moyenne. En général, le rendement est d'autant meilleur que la vitesse des véhicules est plus grande. Cette circonstance est aussi la plus avantageuse au point de vue de l'exploitation d'une ligne, car elle permet de fournir un nombre de voitures-kilomètres donné avec un minimum de véhicules et d'employés.

La puissance nécessaire à l'usine productrice dépend du nombre de véhicules circulant sur la ligne. Voici d'après MM. Crosby et Bell (1) quelques renseignements intéressants à cet égard.

Dans le cas d'une ligne de 6 à 7 km, comportant 5 voitures de 5 tonnes marchant à raison de 13 km à l'heure sur des rampes maxima de 5 à 6 pour 100, on peut admettre que le rapport entre la demande moyenne d'énergie électrique et la demande maxima est un tiers. Dans ces conditions, il faudra pourvoir l'usine de machines capables de développer à un moment donné 100 chevaux environ.

La puissance reconnue nécessaire dans cet exemple peut être concentrée dans une seule machine ; mais, si le capital le permet, il vaut mieux diviser la puissance motrice en deux unités, afin d'avoir une réserve en cas d'accident. Deux machines développant chacune 40 chevaux avec 0,25 d'admission seront suffisantes.

Les chaudières, au nombre de deux également, seront calculées sur la base d'une puissance totale de 100 à 120 chevaux, afin de fournir de la vapeur sèche lors des brusques variations de consommation. Enfin, les deux dynamos génératrices seront prévues également pour une puissance un peu supérieure à celle des moteurs, afin de supporter les à-coups accidentels. On adoptera, par exemple, deux dynamos d'une puissance maxima de 40 kilowatts, fournissant encore un rendement acceptable au débit normal.

Lorsqu'une ligne de tramway comporte de 30 à 35 voitures, le rapport entre la demande d'énergie moyenne et la demande maxima arrive à près de 0,50. Il est alors possible d'adopter les machines du genre Corliss. On aura soin de choisir la grandeur des unités motrices de manière que, en cas d'accident à l'une des

(1) Crosby et Bell, *The Electric Railway*, Johnston, New-York, 1892.

machines, le service puisse se faire au moyen des machines restantes. Les machines ne tourneront ensemble qu'aux heures où le trafic est le plus important. Pendant le milieu de la journée, on peut généralement arrêter quelques unités pour procéder au nettoyage.

Dans les villes où le nombre des véhicules atteint la centaine, on fait usage de voitures allongées à deux boggies, d'une contenance double de celle des voitures ordinaires. Le rapport entre la charge moyenne et la charge maxima est alors voisin de l'unité et l'on peut adopter les machines à triple ou à quadruple expansion et à condensation donnant lieu à la consommation la plus réduite.

Quel que soit le nombre des véhicules, on étudiera la position de l'usine en ayant égard au coût du terrain, à celui des conducteurs et aux facilités d'accès du combustible et de l'eau. Si cette dernière peut être obtenue à bon compte, on fera usage de machines à condensation. Autant que possible, on se rapprochera du milieu de la ligne en vue de réduire la dépense de cuivre.

Les bâtiments de l'usine sont le plus souvent à un étage; ils doivent être disposés de manière à permettre les agrandissements.

Les bâtiments comprennent la halle des machines et la chambre de chauffe, et, éventuellement, des bureaux et un atelier de réparation. Les chaudières sont alignées devant le dépôt de combustible. Les machines à vapeur sont souvent couplées directement aux dynamos par l'intermédiaire de joints isolants, tels que le joint Raffard. Le tableau de distribution est placé à portée de l'électricien qui conduit les dynamos. Au-dessus de la halle des machines règne un pont roulant destiné à faciliter le montage des appareils. Si la halle possède une toiture métallique, celle-ci doit être pourvue d'une doublure intérieure en feutre ou en bois pour éviter la chute de l'eau de condensation sur les machines.

Les fondations des dynamos et des moteurs doivent être particulièrement solides, eu égard aux efforts brusques demandés à ces appareils. On observera les précautions indiquées au § 400, pour isoler les dynamos et empêcher la propagation des vibrations.

En ce qui concerne le calcul des conducteurs, on prendra en considération l'importance de la ligne et la perte de tension consentie. Aux États-Unis, où la tension à l'usine est de 500 volts, on admet une perte maxima d'environ 50 volts. Il en résulte que le fil de trolley, en bronze de haute conductibilité, de 7 mm de dia-

mètre, ne peut être employé comme conducteur unique que dans les lignes très courtes et peu chargées. Pour les lignes ordinaires, on fait usage de feeders et même d'un câble distributeur alimenté par des feeders et relié, de distance en distance, au fil de trolley. La perte maxima de 50 volts est répartie sur le feeder le plus long et les conducteurs qui le séparent de la voiture la plus éloignée. Un calcul simple indiquera, dans chaque cas, la section à donner aux divers conducteurs.

Voici quelques details complémentaires pour l'étude d'un projet.

Dans le cas assez fréquent de deux dynamos compound à l'usine génératrice, celles-ci sont accouplées en parallèle par le procédé indiqué au § 386. On donne une prédominance marquée aux inducteurs en dérivation et l'on prévoit même le moyen de mettre les inducteurs en série en court-circuit. Un petit rhéostat intercalé à la suite des inducteurs en dérivation permet de régler le voltage de chaque machine.

Les pôles négatifs des générateurs sont à la terre, afin de réduire l'attaque des conducteurs de retour sous l'influence de l'électrolyse de l'humidité du sol. Des plaques fusibles sont insérées dans la liaison des générateurs avec le sol. Les pôles positifs communiquent, par l'intermédiaire d'ampèremètres, de fils de sûreté et de parafoudres à rupture de circuit, avec les feeders. Il convient que les parafoudres soient mis à la suite des inducteurs en série, afin que la self-induction de ceux-ci s'oppose à la formation de décharges dangereuses dans l'armature.

Quant à la construction de la ligne, on s'en rapportera aux règles générales données au sujet des lignes aériennes.

La conductibilité des rails servant de retour est assurée par des raccords en cuivre soudés près des éclisses. En outre, on raccorde de distance en distance les rails à une barre de cuivre enfouie entre ceux-ci. Les poteaux sont en bois, ou mieux en treillis métallique. On les encastre dans un lit de béton afin de leur donner une grande rigidité. L'écartement des poteaux dans le sens de la ligne est d'une quarantaine de mètres. Parfois, le fil de trolley est supporté par des potences fixées aux poteaux, mais, le plus souvent, on est obligé de le soutenir par des fils transversaux tendus entre les maisons ou entre des poteaux placés des deux côtés de la rue. Le fil de trolley est généralement en cuivre

ou en bronze de haute conductibilité. Les fils transversaux qui le soutiennent par l'intermédiaire d'isolateurs spéciaux sont en bronze tenace de 5 mm de diamètre. En outre, tous les 200 m environ, on consolide le fil de trolley par des fils horizontaux tendus en croix de St André entre les poteaux latéraux et destinés à limiter le déplacement du conducteur de prise de courant. Lorsque les villes l'exigent, on tend au-dessus du fil de trolley un fil de garde soutenu également par des fils transversaux; mais le fil supplémentaire est souvent une cause de dérangements.

Dans les courbes, le fil de trolley est tendu suivant une forme polygonale, grâce à des fils transversaux rayonnant d'un ou de plusieurs poteaux. On a soin de placer le fil de trolley non dans l'axe des rails mais légèrement vers l'intérieur de la courbe, afin d'empêcher les déraillements du trolley.

## EMPLOI DE CONDUCTEURS SOUTERRAINS.

**619.** — L'emploi des conducteurs aériens a rencontré, dans quelques grandes villes, une opposition motivée par le souci de l'esthétique des rues et la préoccupation d'éviter les accidents qui sont susceptibles de se produire par la chute de conducteurs maintenus à des potentiels élevés. Il convient de dire cependant qu'on est arrivé dans certaines villes américaines à donner une forme satisfaisante aux canalisations des tramways, et nous avons vu que l'électricité y a été reconnue inoffensive lorsque la tension ne dépasse pas 500 volts avec les courants continus. Eu égard à l'économie réalisée par le système aérien et aux sérieuses améliorations de service qu'il procure, beaucoup de villes européennes autorisent ce système.

Pour éviter les fils aériens, on a tenté des combinaisons permettant l'emploi de conducteurs posés, sur isolateurs, dans des galeries situées sous la voirie Le moyen le plus simple de raccorder l'électromoteur au circuit fixe est de faire usage de frotteurs pénétrant dans la galerie par une fente étroite ménagée à la

partie supérieure. Malheureusement, l'eau et la boue qui affluent par cette ouverture peuvent compromettre l'isolement de la ligne, particulièrement dans les pays où les pluies et les neiges sont fréquentes. On arrive cependant à réduire cet inconvénient, dans les villes où existe un bon réseau d'égouts, en écartant les conducteurs de l'axe de la rainure et en ménageant dans le caniveau une pente vers des drains débouchant dans les galeries d'égout. Un personnel spécial doit, en outre, être affecté au curage du caniveau.

Des installations de ce genre fonctionnent d'une manière satisfaisante ; toutefois, la pose et l'entretien d'une canalisation souterraine sont naturellement beaucoup plus coûteux que ceux d'une ligne aérienne.

**620. — Voie souterraine Bentley Knight.** — La fig. 382 montre le truc des voitures utilisées à Alleghany City ainsi qu'une coupe de la voie imaginée par M. Bentley Knight. Le caniveau souterrain est placé sur le bord extérieur de la voie. Il est en béton

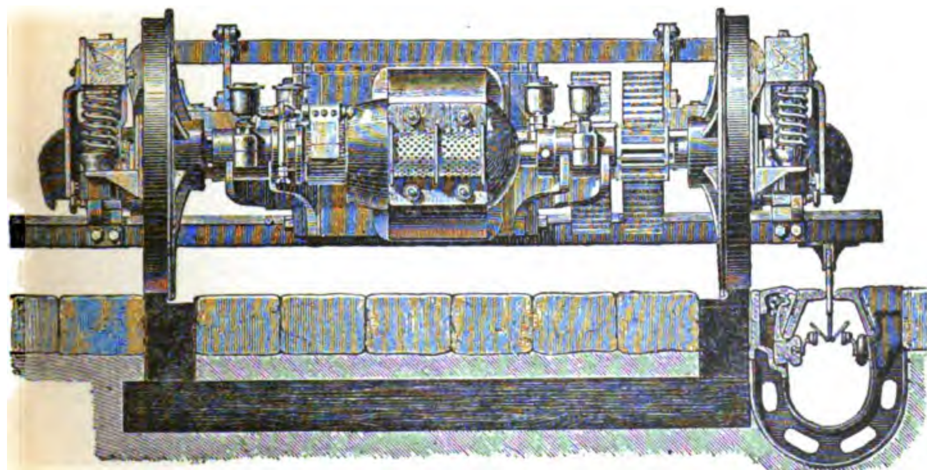


Fig. 382.

revêtu intérieurement de ciment. A des intervalles de 1,20 m, des cadres de fonte en forme de U sont enfouis dans le béton. A ces pièces sont boulonnées des longrines fermant la conduite en laissant entr'elles un intervalle suffisant pour le passage de l'appareil de

contact. A ces mêmes cadres sont fixés latéralement des isolateurs en porcelaine portant sur des agrafes métalliques les deux conducteurs parallèles qui amènent le courant à la voiture par l'intermédiaire de deux frotteurs élastiques. Ceux-ci, en relation par des bandes conductrices avec l'électromoteur, sont attachés à une tige mobile dans une glissière parallèle à la voie. Ainsi qu'on le voit, dans ce système les rails ne jouent aucun rôle au point de vue électrique.

621. — **Tramway à voie souterraine de MM. Siemens et Halske, à Budapest.** — La fig. 383 représente une coupe faite à travers la voie souterraine établie par MM. Siemens et Halske à Budapest [1]. Les conducteurs sont logés dans une conduite en béton située sous l'un des rails et dont la section ovoïde comporte une hauteur de 33 cm sur une largeur de 28 cm. De 1,20 en 1,20 m

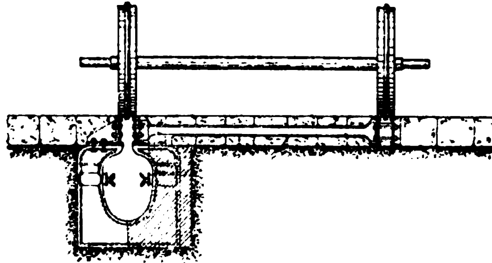


Fig. 383.

des cadres en fonte ayant la forme du canal soutiennent celui-ci en même temps qu'ils servent de gabarits pendant la construction. Ils portent des isolateurs qui soutiennent des conducteurs en forme de cornières. Les rails, du système Haarmann, sont boulonnés aux cadres et ont une section suffisante pour résister aux charges les plus lourdes circulant sur le sol. Ils laissent entr'eux un

(1) *Wochenschrift des Österr-Ingenieur und Architekten-Vereines*, 2 janvier 1891.

intervalle de 33 mm par lequel passe l'appareil de prise de courant. Des orifices d'évacuation vers les égouts sont ménagés à l'eau qui entre dans la conduite.

Il y a actuellement en exploitation à Budapest 8,3 kilomètres de ligne de ce système, présentant des rampes maxima de 0,016 et des courbes dont le rayon descend jusque 25 m.

La vitesse des véhicules varie de 15 à 18 kilomètres à l'heure. Chacune des voitures parcourt 120 à 150 kilomètres par jour.

L'usine génératrice comporte 4 chaudières tubulaires de 100 m² de surface de chauffe et 3 machines horizontales compound à condensation, de 100 chevaux effectifs, attaquant chacune une dynamo à l'aide de câbles. Des feeders transportent le courant à des boîtes de distribution raccordées aux conducteurs de la voie souterraine.

**622. — Voie Lineff.** — Le conducteur principal D est constitué par un tube en fer isolé, contenant un noyau intérieur en cuivre. Il

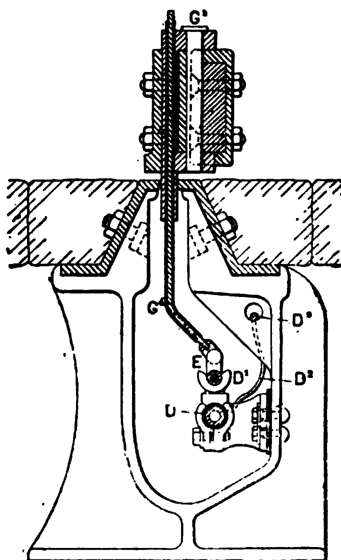



Fig. 384.

est maintenu à une tension constante par des feeders D³ et soutenu, comme dans les cas précédents, à l'intérieur d'une conduite souterraine en béton, par des cadres en fonte rapprochés. Ceux-ci portent

également les longrines qui ferment partiellement le caniveau. A chaque console de fonte, une pièce de métal, en forme de selle, est vissée sur le tube D. C'est sur ces selles que glisse le contact mobile formé par un bout de câble E d'une certaine longueur, attaché à la tige recourbée $G^1$. Celle-ci est articulée sur un petit chariot porté par la voiture et mobile sur des glissières, afin de suivre avec docilité les courbures de la voie. Le retour du courant a lieu par les rails.

La disposition des selles écartées les unes des autres facilite considérablement les croisements de voies.

En outre, la surface nue exposée à l'air étant très réduite, puisque le conducteur D est isolé partout, sauf à l'endroit des projections $D^1$, la ligne présente un isolement satisfaisant. M. Kapp a reconnu expérimentalement qu'une voie semblable présente une résistance à l'isolement supérieure à 1 500 ohms par kilomètre, par les circonstances atmosphériques les plus défavorables.

## SYSTÈMES DIVERS.

**623. — Voie souterraine de Northfleet.** — Toutes les installations de tramways précédemment décrites se rapportent au système de distribution en dérivation. Voici une intéressante tentative de distribution en série, laquelle permet une sérieuse économie sur les conducteurs dans une ligne d'une certaine étendue. La ligne a été établie à Northfleet (Angleterre).

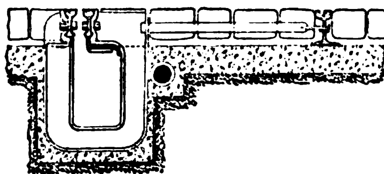


Fig. 385.

Comme le montre la fig. 385, on a disposé le caniveau souterrain, qui mesure 20 cm sur 30 cm, sous un des rails, lequel sert, avec un contre-rail, à limiter l'ouverture pour le passage de l'appareil de prise

de courant. Les rails jumellés sont boulonnés de 1,20 m en 1,20 m à des cadres de fonte noyés dans une conduite en béton de ciment et écartés du rail voisin par des tirants en fer. Le courant arrive par un conducteur isolé C protégé par des tuyaux en grès et retourne par les rails.

Ce conducteur est interrompu à des distances de 6 m et pénètre à ces intervalles dans le caniveau, où il se raccorde à des contacts à

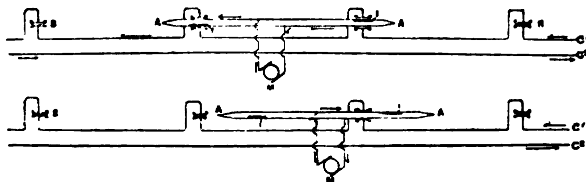


Fig. 386 et 387.

ressorts représentés schématiquement par les fig. 386 et 387, la fig. 388 montrant une vue perspective de l'un des contacts.

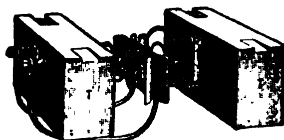


Fig. 388.

Ces contacts comprennent deux lames de bronze, à bords recourbés, pressées l'une contre l'autre par des ressorts à boudin appuyés contre des blocs de faïence vernissée. On a accès à ces contacts par des trappes ménagées dans la voie et recouvertes de pavés en bois.

Une flèche A, portée par la voiture, s'étend sur toute la longueur de celle-ci et est formée de deux bandes de cuivre séparées par une épaisseur de courroie en caoutchouc de 2 cm. Les deux bandes sont en communication avec l'électromoteur M. Chacune d'elles contourne une des extrémités de la flèche et se termine à des intervalles isolants I, I. Les deux bouts sont armés de lames de fer servant à séparer les contacts, lesquels sont espacés de 6 m.

Grâce aux dispositions prises, on voit qu'au moment du passage de la flèche d'un contact au suivant, le bout de câble qui réunit ceux-ci est mis hors du circuit, le moteur restant néanmoins en relation avec la ligne de manière à être traversé par un courant d'intensité et de sens constants.

Les voitures employées à Northfleet, fig. 389, portent un seul moteur en série de 15 chevaux, faisant 400 tours par minute et

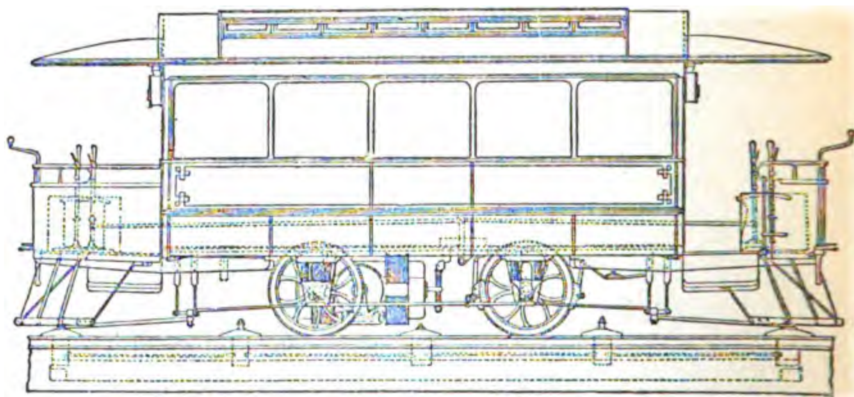


Fig. 389.

appuyé, d'un côté, sur l'essieu moteur, de l'autre, sur le chassis des roues, avec interposition de ressorts en spirale. Par suite de la faible vitesse de la machine, un seul pignon conduit une roue d'engrenage fixée sur l'essieu.

Le réglage du moteur s'opère à l'aide de deux commutateurs portés par les plates-formes. L'un d'eux renverse le courant dans l'induit pour le changement de marche et l'autre introduit des résistances en dérivation sur les inducteurs, afin de diminuer à volonté le couple moteur. Trois éléments de pile secondaire sont intercalés dans le circuit et, le soir, 5 lampes à incandescence servant à l'éclairage de la voiture sont dérivées sur ces couples.

La dynamo génératrice produit un courant constant de 50 ampères sous une différence de potentiel qui varie de 0 à 400 volts grâce à un déplacement automatique des balais sur le collecteur.

**624. — Tramway à rail magnétique de M. Lineff** (1). — M. Lineff, reprenant une idée qui a tenté divers inventeurs, MM. Ayrton et Perry, MM. Arendt et Zunini et M. Pollak entr'autres, a réalisé un tramway à conducteurs souterrains sans communication directe avec les moteurs portés par les voitures. La communication s'établit, par l'intermédiaire de rails spéciaux, au moment où les voitures passent au-dessus de ceux-ci.

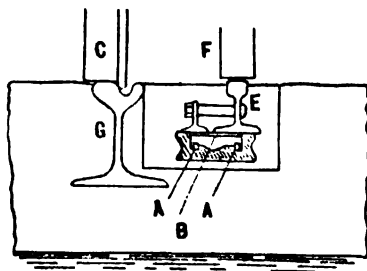



Fig. 390.

Dans la disposition représentée fig. 390, le courant est amené par des conducteurs en cuivre A, A, supportés par des isolateurs dans une conduite en bitume. Le retour du courant a lieu par les rails principaux G et le sol. Sur les conducteurs A repose normalement une bande de fer plate B. Au-dessus est un double rail auxiliaire E, divisé en bouts isolés de peu de longueur. La voiture porte un puissant électro-aimant dont les pôles F, passant très près du rail E, aimantent celui-ci, ce qui provoque le soulèvement de la bande B, comme le montre la figure, et, par suite, la mise en communication des conducteurs A avec deux ou trois tronçons successifs du rail E. Un frotteur attaché à la voiture établit la liaison entre le moteur et les tronçons momentanément actifs. Lorsque l'électro-aimant a dépassé ces tronçons, la bande de fer retombe et est attirée par les tronçons suivants. Pour empêcher le magnétisme remanent de déterminer la persistance de l'attraction, on galvanise la bande mobile afin d'éviter le contact direct de fer avec fer.

(1) *La Lumière Électrique*, 23 août 1890.

L'électro-aimant est traversé par le courant amené par le conducteur mobile. Au besoin, un petit accumulateur peut exciter l'électro-aimant en cas de déraillement de la voiture.

Des expériences effectuées par M. Kapp ont montré que les tronçons de rail électrisés ne s'étendent que sur une longueur maxima de 6 m, alors qu'une voiture ordinaire couvre un espace de 7 m, ce qui empêche les personnes et les animaux de recevoir des secousses dangereuses.

Les bouts du rail magnétique deviennent successivement des pôles N et des pôles S, au moment du passage des branches de l'électro-aimant. L'excitation de celui-ci demande une dépense de 0,5 à 0,75 cheval, mais le système Lineff a le grand avantage sur les systèmes à prise de courant directe d'éviter l'entretien onéreux d'une conduite exposée à recevoir les eaux superficielles du sol.

Lorsque la voie est mouillée et couverte de boue, M. Kapp a trouvé que la perte par le rail magnétique correspond à 45 watts par voiture avec une tension de 300 volts au conducteur isolé.

**625. — Transport aérien.** — MM. Jenkin, Ayrton et Perry ont imaginé d'appliquer la traction électrique à de petites voies aériennes, telles que celles qu'on emploie pour transporter les matériaux en pays accidentés. Dans le système préconisé par ces inventeurs, les véhicules composant le train aérien sont conduits par un remorqueur électrique et suspendus par des galets à un seul conducteur métallique qui donne accès au courant.

La ligne à double voie est formée par des tiges d'acier tendues sur des potences doubles. Les tiges sont interrompues à chaque poteau, de manière à constituer autant de tronçons séparés qu'il y a de portées. Les tronçons des deux lignes voisines sont réunis électriquement en croix à chaque poteau, les deux groupes de sections communiquant avec une dynamo génératrice. De là résulte que deux tronçons successifs d'une même ligne sont toujours en relation avec les deux pôles de la machine.

L'électromoteur porté par le petit remorqueur est relié avec la ligne par les deux essieux extrêmes du train, lequel a une longueur égale à celle des tronçons de ligne; il s'ensuit que la machine réceptrice est toujours dans le circuit du générateur. On remarquera que le courant change de sens dans le moteur chaque fois que le

train a franchi une section, mais ce renversement ne modifie pas le sens de la rotation de l'induit. Le mouvement de celui-ci est transmis par des courroies aux galets qui portent le remorqueur.

Ce système présente les avantages des systèmes aériens en général. Il évite la construction d'ouvrages d'art dans des terrains accidentés et supprime les frais d'acquisition des terrains. Afin de pouvoir, comme avec les systèmes à traction par câble, gravir les rampes escarpées, il faut suppléer au défaut d'adhérence par des galets serrant le rail qui les supporte. Par contre, le système électrique est mieux approprié que le système mécanique aux lignes présentant des courbes.

**626. — Chemins de fer électriques urbains.** — L'application de la traction électrique aux chemins de fer urbains fait l'objet de tentatives très intéressantes motivées par les avantages sérieux que l'on peut attendre de ce mode de traction. L'emploi de la vapeur présente de grands inconvénients dans les villes. A Londres, où les lignes sont souterraines, la fumée des locomotives corrompt l'air des tunnels; à New-York, la fumée des trains aériens constitue une gêne pour les habitants riverains.

Sur les lignes interurbaines à grand trafic, l'emploi de l'électricité permettrait une accélération notable de la vitesse des trains. Par suite du poids énorme des locomotives à vapeur et du mouvement de lacet dont elles sont animées et qui provient des efforts alternatifs des pistons, on est obligé de construire les voies et les ouvrages d'art avec une solidité cinq à six fois supérieure à celle qu'exigent de simples wagons. En outre, la moitié de l'effort de traction appliqué à un train ordinaire est souvent absorbée par l'entraînement de la machine. Ces considérations limitent l'allure des locomotives à vapeur à des vitesses qui pourraient être notablement dépassées par les locomotives électriques. En effet, les efforts exercés par les électromoteurs se réduisent à un couple situé dans un plan normal à l'essieu, ce qui supprime le mouvement de lacet. Le poids des locomotives électriques pourrait être réduit à la valeur nécessitée pour assurer l'adhérence, et l'absence de chaudière permettrait d'amener le centre de gravité beaucoup plus bas que dans la locomotive à vapeur. Ces raisons permettent de prévoir des vitesses exceptionnelles.

Au point de vue de la sécurité, il résulte de l'expérience que les chances de déraillement n'augmentent pas avec la vitesse, ce qui s'explique par la tendance qu'ont les mobiles animés d'un mouvement de rotation à conserver la direction du déplacement.

Le mécanicien d'une locomotive électrique, n'ayant à s'occuper ni de la conduite d'un feu, ni de l'alimentation d'une chaudière, peut consacrer toute son attention à la surveillance de la voie, et la sécurité est ainsi augmentée. Enfin, la traction électrique permet de réaliser simplement un système de block automatique d'une efficacité assurée; il est facile, en effet, d'imaginer un mécanisme permettant à un train de couper le courant au train qui le suit aussi longtemps qu'il n'a pu lui-même dépasser une limite déterminée.

L'interdiction des voies ferrées à l'accès du public rend possible l'emploi de conducteurs économiques, aériens ou posés au niveau du sol, traversés par des courants de tension élevée. Dans ces conditions, la combinaison de dynamos à grand rendement et de machines fixes compound à condensation n'exigerait pas une consommation de combustible sensiblement plus grande que la traction par la vapeur, et le bien-être des voyageurs serait accru. L'électricité se prête mieux que la vapeur au fractionnement des trains, car, au besoin, une voiture isolée peut être munie d'un électromoteur et faire un service omnibus entre les trains directs.

Se basant sur les qualités propres aux locomotives électriques, des experts tels que MM. Sprague et Crosby n'hésitent pas à recommander ces propulseurs sur les lignes interurbaines à grand trafic. Dans ce cas, on aurait à échelonner sur la ligne, à des distances de 30 à 40 kilomètres environ, des stations génératrices pourvues de grands moteurs à vapeur perfectionnés. D'après des expériences qu'ils ont faites, ces électriciens déclarent qu'on pourrait atteindre des vitesses de 200 kilomètres à l'heure avec le même effort de traction que celui qu'absorbent les locomotives à vapeur faisant 140 kilomètres à l'heure, vitesse la plus élevée qu'atteignent actuellement les trains. La raison de la réduction obtenue sur l'effort de traction par l'électricité résulte de la diminution considérable du poids des remorqueurs.

**627. — Traction électrique du City and South-London Rail-**

**way** (¹). — L'application de la traction électrique aux chemins de fer à grande section a trouvé un commencement de réalisation dans la ligne souterraine qui relie la Cité de Londres au district suburbain de Stockwell et qui comporte quatre arrêts intermédiaires. Deux voies parallèles sont posées dans deux tunnels distincts creusés à une profondeur minima de 12 m. Ces tunnels jumeaux de 6 kilomètres de longueur présentent une section circulaire de 3 m de diamètre et sont revêtus de fonte. On a accès aux gares par des ascenseurs capables de transporter d'un coup 100 personnes, charge maxima d'un train.

Le matériel de traction étudié par MM. Hopkinson comprend 14 locomoteurs électriques de 100 ohevaux, capables de remorquer 3 wagons à la vitesse de 40 kilomètres à l'heure.

Chaque locomoteur, fig. 391, comporte deux électromoteurs en série, de 50 chevaux, dont les armatures ont pour axes les essieux. Ceux-ci sont indépendants et font environ 240 tours par minute.

Le courant est amené de la station génératrice par des feeders isolés et recouverts de plomb, mis en communication de distance en distance avec un conducteur en acier doux placé au milieu de la voie,

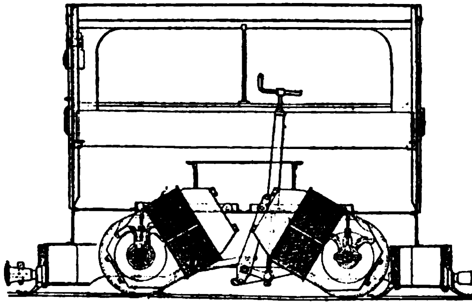


Fig. 391.

comme dans la ligne de Bessbrook à Newry. Ce conducteur est supporté par des isolateurs en verre et n'occasionne qu'une perte égale à 0,01 du courant total lorsque la tension est de 500 volts. La prise

(¹) *La Lumière Électrique*, 22 novembre 1890, page 362.

du courant se fait par des sabots en fer reliés, par l'intermédiaire d'un ampèremètre, d'un rhéostat de réglage et d'un appareil de changement de marche, avec les électromoteurs. Le retour du courant s'opère par les rails et le sol.

Les locomoteurs sont munis d'un frein à main et du frein Westinghouse exigé par les règlements du Board of Trade.

Les trois wagons de chaque train sont à couloir central. Ils ont 2,10 m de hauteur sur 9 m de longueur, et sont portés par deux boggies à quatre roues. Dans chaque voiture se trouvent quatre lampes à incandescence reliées en série au conducteur de prise de courant. Un train complet portant 100 personnes pèse une trentaine de tonnes, soit trois fois le poids du locomoteur.

La station génératrice située au terminus de Stockwell comporte trois machines compound de 375 chevaux, tournant à 100 tours et pourvues de puissants régulateurs capables de faire varier l'admission de zéro aux trois quarts de la course.

Chaque moteur attaque une dynamo Edison-Hopkinson compound capable de développer 500 volts et 450 ampères. Le rapport entre la puissance électrique des dynamos et la puissance indiquée des moteurs à vapeur dépasse 75 pour 100. Le rapport entre le travail utile des électromoteurs et le travail indiqué des machines serait d'environ 60 pour 100. Les dynamos communiquent avec les feeders par l'intermédiaire de coupe-circuits de sûreté.

L'aérage des tunnels est parfait, grâce aux trains qui jouent le rôle de pistons et refoulent l'air vers les gares qui forment cheminées d'appel.

## TRACTION PAR ACCUMULATEURS.

**628. — Examen des conditions techniques.** — Au lieu de maintenir les véhicules d'une ligne en communication avec des générateurs situés à poste fixe, on peut charger, à l'aide de ceux-ci, des accumulateurs qu'on hisse sur les véhicules à remorquer.

Ce système n'entraîne pas les inconvénients qu'on reproche aux conducteurs électriques dans les tramways urbains, et il assure une complète indépendance aux divers véhicules. De plus,

les machines génératrices exigées sont moins puissantes que dans les procédés directs de traction, puisqu'elles fonctionnent sous un régime constant et dans les meilleures conditions de rendement. L'avantage théorique des accumulateurs croît avec la longueur de la voie, car les frais n'augmentent pas avec cet élément, comme dans le cas de la traction par câbles aériens ou souterrains. Enfin, la traction par accumulateurs est la seule possible, lorsque les véhicules ont un itinéraire variable, ce qui arrive avec les omnibus et les voitures de pavé, ainsi qu'avec les embarcations maritimes ou fluviales.

Malheureusement le poids des accumulateurs a été jusqu'à présent un obstacle sérieux au développement de leur emploi.

Les accumulateurs les plus légers n'ont pas un débit spécifique supérieur à deux ampères par kilogramme de plaques sous une tension de 1,9 volt; la puissance spécifique est alors d'environ 3 watts par kilogramme d'accumulateur.

Cherchons le poids d'accumulateurs que doit, dans ces conditions, porter une voiture, pesant 4 tonnes avec le moteur électrique, pour gravir une rampe de 3 pour 100 à la vitesse de 10 kilomètres à l'heure.

En appliquant la formule

$$P_{\text{watts}} = \frac{p\,v\,(f+i)}{0,102}, \quad \S\ 617,$$

et en supposant $f = 0,012$, on a, en appelant $x$ le poids cherché,

$$3\,x = \frac{(4\,000 + x)\,\frac{10\,000}{3\,600}\,(0,012 + 0,03)}{0,102};$$

d'où $x$ est égal à près de 2,5 tonnes, c'est à dire que le poids des accumulateurs serait égal à 3 ou 4 fois le poids du moteur et de la transmission; la puissance requise est 7,5 kilowatts ou 10,2 chevaux.

D'après les expériences faites aux États-Unis, les voitures de tramway demandent environ 450 watts-heure par voiture-kilomètre. En admettant cette base, malgré la surcharge trouvée dans le cas présent, et en estimant à 20 watts-heure par kilogramme

l'énergie spécifique des couples secondaires, on voit que les 2,5 tonnes d'accumulateurs sont capables de produire

$$\frac{2\,500 \times 20}{450} = 111 \text{ voiture-kilomètres,}$$

soit à peu près le parcours journalier des voitures dans nos grandes villes.

Les accumulateurs actuels ne paraissent pas appropriés aux lignes à profils accidentés. Mais, pour les lignes à faibles rampes le poids peut être notablement réduit, à la condition de remplacer les accumulateurs deux ou trois fois par jour. Aux points de vue de l'entretien et de la durée, cette réduction n'est toutefois pas à conseiller, si l'on peut faire autrement.

Ainsi dans l'hypothèse d'une rampe maxima de 1,5 pour 100, les formules précédentes fournissent un poids de 1,5 tonne d'accumulateurs environ et un nombre de voiture-kilomètres égal à 67.

La comparaison entre la traction directe et la traction par accumulateurs doit, au point de vue technique, être basée à la fois sur le rendement des appareils et sur le rapport de la charge utile à la charge totale des véhicules.

Des expériences faites, aux États-Unis, par MM. Bell, Sprague et Hale, il résulte que le rapport de l'énergie électrique disponible aux véhicules à la puissance indiquée aux cylindres des machines à vapeur est voisin de 0.65. En estimant à 0,75 le rendement maximum des moteurs et de leurs transmissions, le rendement total devient $0,65 \times 0,75$, c'est à dire près de 50 pour 100. Dans le cas de la traction par accumulateurs, les générateurs ont un rendement meilleur que dans le cas précédent et l'on peut compter sur un rapport égal à 0,80 entre la puissance absorbée par les batteries et la puissance indiquée aux machines à vapeur. Les accumulateurs étant soumis à un régime forcé et variable ont un rendement qui ne dépasse guère 70 pour 100; en conservant 0,75 pour le rendement du moteur, on obtient un rendement final de

$$0,80 \times 0,70 \times 0,75 = 0,42.$$

Considérons une voiture de 5 mètres, pouvant contenir 30 personnes donnant un poids total de 1 800 kg, et pesant pour la caisse seule 1 800 kg et, avec le moteur, les transmissions et les

voyageurs, 4 300 kg. Une telle voiture exigera une surcharge d'au moins 1 500 kg d'accumulateurs dans le système de traction indirecte.

Appelons coefficient caractéristique d'un système le produit du rendement total par le rapport du poids utile (caisse et voyageurs) au poids total.

On aura dans le système direct

$$0{,}50 \times \frac{1\,800 + 1\,800}{4\,300} = 0{,}418,$$

et dans le système par accumulateurs,

$$0{,}42 \times \frac{1\,800 + 1\,800}{4\,300 + 1\,500} = 0{,}26.$$

Ces chiffres, qui n'ont rien d'absolu, montrent que la comparaison est tout à l'avantage de la traction directe.

**629. — Systèmes divers.** — La traction par accumulateurs, tentée d'abord en France par M. Raffard, a été ensuite expérimentée à Bruxelles par MM. Julien et Van Vloten.

La ligne sur laquelle la Compagnie des Tramways Bruxellois a effectué des essais de traction électrique offre des conditions particulièrement difficiles pour le système par accumulateurs. Sur une longueur de 1 600 m, elle présente, entr'autres, une rampe de 3,5 pour 100, qui s'étend sur près de 400 m. Cette ligne demande deux et parfois trois chevaux pour chaque voiture.

Les véhicules ont été pourvus de 120 accumulateurs de 13 kg, soit une surcharge de 1 560 kg pour une voiture dont le poids est de 6 000 kg, y compris les voyageurs et le moteur. La batterie secondaire est répartie dans quatre tiroirs en bois introduits sous les banquettes de la voiture par des panneaux s'ouvrant latéralement vers l'extérieur. Ces tiroirs portent sous la paroi du fond des bandes métalliques qui viennent en contact avec des bandes correspondantes fixées à la voiture et en relation avec le commutateur. Le moteur, fixé sous le plancher du véhicule, attaque par un pignon denté un axe intermédiaire, lequel transmet le mouvement à l'un des essieux par une chaîne Galle.

On a d'abord employé un commutateur qui permettait de réunir

au moteur deux séries d'éléments groupées soit en tension, soit en dérivation. Mais on a reconnu que le passage d'un cran du commutateur au suivant occasionnait des chocs au moteur, et l'on a préféré conserver le groupement en série, en modifiant le courant par un rhéostat, comme dans les voitures recevant directement le courant des générateurs. Ce système assure une grande douceur aux manœuvres et, s'il a l'inconvénient de donner lieu à une perte d'énergie électrique, il est favorable à la conservation des batteries, car tous les éléments travaillent toujours dans les mêmes conditions.

La voiture peut franchir 35 kilomètres, soit le tiers du parcours journalier, avec sa provision d'énergie. Elle rentre alors au dépôt afin de renouveler ses batteries secondaires. Là, les tiroirs à accumulateurs sont glissés sur des tables mobiles arrivant au niveau des batteries et portant, à la partie supérieure, des galets sur lesquels roulent les tiroirs pour arriver aux tables de chargement. Les diverses batteries d'accumulateurs à charger sont réunies en tension par groupes de 216 éléments et reliées à des dynamos à courant constant dont chacune charge deux groupes d'éléments.

On estime qu'après un service de 12 000 kilomètres les plaques positives doivent être réparées par le renouvellement des oxydes. Après quatre opérations semblables, il faut les remplacer. Les plaques négatives ont une durée indéterminée.

Les frais d'entretien des accumulateurs, d'abord estimés à 10 centimes par voiture-kilomètre, ont été réduits à 7 centimes. Les essais ont été interrompus parce qu'on a reconnu que le profil de la voie obligeait à faire travailler les accumulateurs sous un débit spécifique variant de 3 à 5 ampères par kilogramme de plaques.

M. Gadot a étudié un projet pour la traction, à l'aide d'accumulateurs, des tramways parisiens dont les voitures pèsent 7 tonnes. M. Gadot estime que, dans ce cas, la meilleure solution consiste à placer un moteur sous la caisse de la voiture et à disposer les accumulateurs sur une sorte de fourgon, afin de ne pas avoir à ramener les voitures au dépôt pour le remplacement des batteries. Les fourgons seuls reviennent à l'usine, où les accumulateurs sont mis en charge sur les véhicules mêmes qui les supportent. Cette disposition augmente le poids mort à remorquer, mais elle facilite les manipulations et paraît préférable à la précédente au point de vue de la conservation des batteries secondaires.

MM. Philippart frères poursuivent des essais à Paris, au moyen de voitures portant leur chargement d'accumulateurs. Une des caractéristiques du système est que les essieux comportent une roue calée et une roue folle, de manière à diminuer les frottements dans les courbes, § 617.

Au concours de traction mécanique des tramways qui a eu lieu à l'exposition d'Anvers en 1885, le système de traction par accumulateurs a été essayé concurremment avec des tramways à vapeur, à eau chaude et à air comprimé, et il a obtenu le premier prix. Suivant le rapport de la Commission d'essais, les voitures électriques présentent sur les voitures à vapeur l'avantage de ne pas donner de fumées ni d'escarbilles. Elles fatiguent moins la voie et ne consomment pas plus de combustible, étant donné que les accumulateurs sont chargés par des machines fixes économiques. Comparés aux systèmes d'accumulateurs à eau chaude et à air comprimé, les accumulateurs électriques procurent un meilleur rendement et permettent d'emmagasiner la même quantité d'énergie sous un poids moindre.

## PRIX DE REVIENT DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE.

630. — **Traction animale.** — Dans l'estimation des frais de la traction électrique, il faut avoir particulièrement en vue la substitution de celle-ci à la traction animale. M. Gadot, qui a fait un projet pour les tramways électriques de Paris, a trouvé des renseignements précis relativement aux dépenses occasionnées par les chevaux dans les rapports de la Compagnie Générale des Omnibus.

Les voitures de tramway de cette compagnie sont à impériales et contiennent 50 personnes, soit 52 avec le cocher et le receveur. Le poids de la voiture vide est de 3 600 kg. En comptant le poids moyen d'une personne à 70 kg, on arrive au poids total de 7 000 kg.

Le parcours journalier d'une voiture est d'un peu moins de 100 kilomètres.

Voici comment se sont décomposées les dépenses par journée de cheval pendant l'exercice 1883 :

| | | |
|---|---|---|
| Solde et prime des cochers . . . . . . . . . | fr. | 0,4670 |
| Entretien et renouvellement des harnais . . . . | » | 0,1104 |
| Solde des inspecteurs de la cavalerie . . . . . | » | 0,0056 |
| Solde des chefs de dépôt. . . . . . . . . . . | » | 0.0251 |
| Solde des piqueurs . . . . . . . . . . . . | » | 0,0238 |
| Service vétérinaire, infirmerie et médicaments . . | » | 0,0242 |
| Solde des palefreniers. . . . . . . . . . . . | » | 0,2720 |
| Solde des relayeurs et côtiers, employés divers . . | » | 0,2333 |
| Achat d'eau . . . . . . . . . . . . . . . | » | 0,0130 |
| Nourriture des chevaux . . . . . . . . . . . | » | 2,4092 |
| Renouvellement des chevaux . . . . . . . . . | » | 0,4439 |
| Ferrage des chevaux . . . . . . . . . . . . | » | 0,1167 |
| Chevaux au labour . . . . . . . . . . . . | » | 0,0567 |
| Entretien du mobilier des dépôts. . . . . . . | » | 0,0367 |
| | fr. | 4,2313 |
| d'où il faut déduire la recette des fumiers. . . . . | » | 0,0970 |
| Reste, par journée de cheval : | fr. | 4,1343 |

Pendant l'exercice 1883, le parcours quotidien d'une voiture de tramway a été de 94,206 kilomètres et le nombre moyen de chevaux par voiture 13,95, y compris les chevaux d'infirmerie, de labour, de corvée et d'inspection. Le prix de la voiture-kilomètre est donc

$$\frac{4,1343 \times 13,95}{94,206} = 0,612 \text{ fr.}$$

Il convient d'ajouter à cette somme les intérêts à 6 % du capital chevaux, harnais, fourrage, soit par voiture-kilomètre 0,031 ; ce qui donne en tout 0,643 fr.

En répétant ces divers relevés pour les exercices 1884 à 1888, pendant lesquels il n'y a eu ni épidémie de chevaux, ni disette de fourrage, M. Gadot est arrivé à la moyenne de 0,561 fr. par voiture-kilomètre pour le prix de la traction animale, en comptant, comme on l'a vu, exclusivement les frais de traction.

A Bruxelles, sur la ligne où l'on a fait l'essai de traction par accumulateurs relaté au § 629, les dépenses occasionnées par les chevaux se répartissent de la manière suivante par journée de cheval, le type de voiture employé contenant 30 personnes :

| | | |
|---|---|---|
| Nourriture | fr. | 1,950 |
| Personnel d'écurie | » | 0,700 |
| Vétérinaire | » | 0,040 |
| Magasins à fourrage | » | 0,004 |
| Ferrage | » | 0,150 |
| Divers | » | 0,018 |
| Renouvellement des chevaux | » | 0,370 |
| Sellerie | » | 0,070 |
| Eaux | » | 0,007 |
| Main-d'œuvre d'écurie | » | 0,018 |
| | fr. | 3,327 |

On estime que le nombre de journées de cheval est, sur cette ligne, de 17 150 par an, et le nombre de voitures-kilomètres parcourus de 214 426 ; soit par voiture-kilomètre

$$\frac{17\,150 \times 3,327}{214\,426} = 0,266 \text{ fr.}$$

Cette somme ne comprend ni les frais généraux de direction, ni l'éclairage et chauffage des dépôts, ni l'entretien du matériel roulant, postes qui font monter le prix total de la voiture-kilomètre à plus de 0,30 fr.

**631. — Traction par accumulateurs.** — M. Gadot a ensuite procédé à l'estimation de la traction par accumulateurs, en adoptant à dessein des rendements trop faibles afin de mettre le résultat comparatif à l'abri de toute critique. Il a supposé une ligne ayant 20 voitures en service et 5 voitures de réserve.

Il a estimé le rendement de la dynamo de charge à 80 pour 100, le rendement des accumulateurs à 50 pour 100, celui de la dynamo réceptrice à 75 pour 100 et enfin celui de la transmission à 83,33 pour 100. Le rendement total n'est alors que 25 pour 100.

Il résulte de ce qui précède que, pour une puissance égale à 1 000 disponible sur l'essieu du véhicule, l'électromoteur devra développer 1 200, les accumulateurs 1 600, le générateur 3 200 et la machine à vapeur 4 000.

M. Gadot estime que 3.5 kg de plaques d'accumulateur sont nécessaires par tonne à remorquer et par kilomètre, soit 5 kg de

Solde et prime des coch[illegible] [illegible] $x$ nécessaire pour remorquer
Entretien et renouvell[illegible] [illegible] moteur et sa transmission sur
Solde des inspecteurs [illegible] [illegible] la moitié du parcours effectué
Solde des chefs de dép[illegible] [illegible] né par l'équation
Solde des piqueurs [illegible] [illegible] $\times$ 0,005 = $x$,
Service vétérinaire, [illegible]
Solde des palefre[illegible]
Solde des relaye[illegible] [illegible] 2 500 kg.
Achat d'eau [illegible] [illegible] numériques du § 617, la rampe
Nourriture de[illegible] [illegible] véhicule se déduira de l'équation
Renouvelleme[illegible]
Ferrage de[illegible] [illegible] $\frac{[illegible] + 2\,500)\,2,78}{0,102}$ (0,012 + $x$);
Chevaux [illegible]
Entreti[illegible]

$x$ = 1,5 pour 100.

d'où il [illegible] faudra 5 tonnes d'accumulateurs par voiture, [illegible] y compris une réserve de 13 pour 100, on [illegible] d'accumulateurs, renfermant 80,5 tonnes de [illegible] estime que 1 kg de plaques débite 7 ampères-[illegible] moyenne de 1,80 volt, soit

$$\frac{7 \times 1,8}{736} = 0,0171 \text{ chevaux-heure.}$$

[illegible] tonnes de plaques en service, il faudra produire à

$$\frac{0,0171 \times 70\,000}{0,40},$$

[illegible] 200 chevaux effectifs pendant 15 heures.

[illegible] de traction peuvent être estimés comme suit :

[illegible] de dépôt :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 chef de dépôt . . . . . . . . . . | par an, | fr. | 4 800 | » |
| 1 contre-maître électricien . . . . | » | » | 3 600 | » |
| [illegible] électriciens à 2 700 fr. . . . . . | » | » | 16 200 | » |
| [illegible] manœuvres à 1 800 fr. . . . . . | » | » | 18 000 | » |
| [illegible] conducteurs électriciens à 3 000 fr. | » | » | 63 000 | » |
| A reporter : | | fr. | 105 600 | » |

| | | |
|---|---|---|
| Report : | fr. | 105 600 » |
| Force motrice de charge : 2 962 chevaux-heure à 0,085 fr., par an . . . . . . . . . . . . | » | 91 896,05 |
| Intérêts du capital accumulateurs, 80,5 tonnes à 1 250 fr., soit 100 625 fr. à 6 pour 100, par an. . | » | 6 037,50 |
| Réparations aux accumulateurs, 0,30 fr. par kg de plaques . . . . . . . . . . . . . . . | » | 24 150 » |
| Amortissement des plaques des accumulateurs : dans l'hypothèse de deux renouvellements complets des plaques par an, on arrive, en comptant les plaques à 0,85 fr. le kg, à 70 000 × 0,85 × 2 = fr. 119 000 d'où il faut déduire 0,20 fr. par kg de plaques usées . . . . . . . . » 28 000 | | |
| Reste . . . . | » | 91 000 » |
| Pour l'intérêt, l'entretien et l'amortissement des dynamos, des électromoteurs et des mécanismes des voitures. . . . . . . . . . . . . . . | » | 64 250 » |
| Imprévus et divers . . . . . . . . . . . | » | 10 000 » |
| Total | fr. | 392 933,55 |

pour 100 × 20 × 365 = 730 000 voitures-kilomètres, soit 0,538 fr. par voiture-kilomètre pour les frais de pure traction. On remarquera que les installations motrices ont été laissées de côté, de même que, dans le cas de la traction animale, le prix des écuries, remises, etc. Le prix d'entretien des accumulateurs est compté à 12,5 centimes par voiture-kilomètre, ce qui est un chiffre relativement élevé. En répétant ces calculs dans l'hypothèse de 3 séries d'accumulateurs par jour, M. Gadot a trouvé seulement 0,507 fr. par voiture-kilomètre. Enfin, en supposant les accumulateurs sur un fourgon, § 629, et trois remplacements par jour, on arrive également à 0,507 fr. par voiture-kilomètre.

On a donc, dans ces deux derniers cas, un bénéfice de 0,561 — 0,507 = 0,054 fr. en faveur de la traction par accumulateurs, dans l'hypothèse de voies relativement unies. Il convient toutefois de remarquer que le devis de la traction animale se rapporte au profil moyen des lignes de tramway de Paris.

Il faut ajouter en faveur des accumulateurs que les frais d'immo-

bilisation qu'ils entraînent sont moindres que ceux occasionnés par les chevaux, qu'ils mettent les compagnies à l'abri des pertes provenant des épidémies et des disettes de fourrage et qu'ils permettent d'augmenter sans grande dépense le nombre des voitures en service à certaines heures de la journée et à certains jours où le trafic est accru, alors qu'on ne peut songer à entretenir des chevaux de renfort pour un service exceptionnel.

Enfin, l'un des grands avantages de la traction électrique résulte de l'inutilité du pavage de la voie, qui coûte cher d'établissement et d'entretien. L'économie de ce chef est surtout importante dans les lignes suburbaines à créer sur les chaussées macadamisées.

Voici des devis que nous devons à l'obligeance de M. Van Vloten, directeur du service électrique aux Tramways Bruxellois.

Devis d'une installation comprenant 12 voitures automobiles contenant 30 personnes, ces véhicules effectuant un parcours journalier de 100 kilomètres sur une voie exigeant l'emploi de deux chevaux par voiture :

| | | |
|---|---|---|
| Force motrice : 2 machines de 120 chevaux à condensation | fr. | 30 000 |
| Fondations, tuyauterie | » | 5 000 |
| Transmissions | » | 3 100 |
| Cheminée | » | 3 500 |
| 2 chaudières de 120 ch., filtre épurateur, etc. | » | 19 000 |
| 8 dynamos de 16,5 kilowatts, avec fondations, tendeurs, etc. | » | 40 000 |
| Courroies | » | 1 000 |
| Accumulateurs : 40 batteries de 120 éléments de 13 kg, à 1 800 fr. l'une | » | 72 000 |
| Tiroirs, boîtes | » | 24 000 |
| Matériel roulant : 16 voitures avec installation électrique, à 6 000 fr. l'une | » | 96 000 |
| Installation mécanique de chargement | » | 10 000 |
| Appareils de mesure, outillage, divers | » | 12 000 |
| Total : | fr. | 315 600 |

Devis d'exploitation pour 12 voitures en service, effectuant un effet utile total de 1 200 voitures-kilomètres par jour :

Par voiture-kilomètre.

| | | |
|---|---|---|
| Consommation de charbon . . . . . . . . . . | fr. | 0,025 |
| Graissage . . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 0,007 |
| Entretien et remplacement des organes mécaniques et électriques . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 0,025 |
| Entretien des accumulateurs. . . . . . . . . . | » | 0,070 |
| Divers . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 0,015 |
| Salaire des ouvriers chargés de l'entretien, non compris les conducteurs. . . . . . . . . . . . | » | 0,033 |
| Direction, frais généraux . . . . . . . . . . | » | 0,050 |
| | fr. | 0,225 |

A cette somme, il convient d'ajouter la part correspondant à l'intérêt et à l'amortissement des installations.

632. — **Prix de la traction électrique par fil aérien.** — Nous trouvons dans un travail de M. Crosby [1] des renseignements très intéressants sur le coût de la traction directe par fil aérien simple aux États-Unis. Dans la comparaison de ces données avec celles qu'accusent les compagnies européennes, il faut avoir égard à ce fait que, dans l'Union américaine, les salaires sont très élevés. M. Crosby a eu l'occasion de relever les frais de traction des tramways électriques installés dans les villes de Washington, Richmond et Cleveland. Dans ces trois lignes, les nombres de voitures-kilomètres par jour et par kilomètre de ligne sont respectivement 200, 138 et 400 (double voie).

D'après les documents qu'il a eus en mains, il a reconnu que l'équipement d'un kilomètre de ligne aérienne à simple voie et avec poteaux en bois revient à 4 700 fr. Une ligne à double voie et à deux rangées de poteaux métalliques coûte 11 000 fr. Enfin, une ligne à double voie, avec une seule rangée de poteaux métalliques à doubles potences, revient à 8 500 fr.

Le coût de l'installation électrique d'une voiture, comprenant deux moteurs et leurs transmissions, s'élève à 7 500 fr. On estime que chaque voiture demande une puissance électrique de 10 chevaux

[1] *Electrical World*, 1890.

à l'usine. Le prix des moteurs à vapeur avec leurs accessoires se compte à 225 fr. par cheval. C'est également le prix par cheval des dynamos génératrices et des appareils électriques auxiliaires de l'usine.

Ces éléments permettent d'estimer la part d'intérêts et d'amortissements afférant à la traction. M. Crosby compte sur les machines à vapeur, sur les dynamos, ainsi que sur l'équipement des lignes et des voitures, un intérêt de 5 pour 100, un amortissement de 5 pour 100 et un taux de 2 pour 100 pour les taxes et les assurances; soit en tout 12 pour 100. Dans ces conditions, il est arrivé pour les trois lignes susdites respectivement à 5,6 ctms, 7 ctms et 5,2 ctms. Restent les bâtiments des machines, qui, pour une ligne comportant 1 600 voitures-kilomètres par jour, coûtent 75 000 fr., sur lesquels on compte 5 pour 100 d'intérêt, 2 pour 100 d'amortissement et 2 pour 100 pour taxes et assurances; ce qui conduit à 1,15 centime par voiture-kilomètre.

La consommation de charbon par voiture-kilomètre, a été, dans les trois villes, 1,4 kg, 2,3 kg et 1,5 kg, poids qui, eu égard aux prix du combustible dans ces localités, ont occasionné des frais s'élevant respectivement à 2,2 ctms, 2,2 ctms et 2,5 ctms. Le prix de l'huile, chiffons, et les autres menues dépenses peuvent s'estimer uniformément à 0,6 ctms par voiture-kilomètre.

Enfin les salaires des ingénieurs, mécaniciens, électriciens et nettoyeurs, non compris ceux des conducteurs et receveurs des voitures, reviennent par voiture-kilomètre respectivement à 7,8 ctms, 7,8 ctms et 6,2 ctms.

L'ensemble de ces frais représente, pour Washington, 17,35 ctms; pour Richmond, 18,75 ctms, et pour Cleveland, 14,65 ctms, par voiture-kilomètre. La moyenne des trois lignes donne 16,9 centimes par voiture-kilomètre.

Ces résultats montrent que le prix des salaires s'élève à 40 pour 100 et celui du combustible à 12 pour 100 seulement des frais de traction.

633. — **Prix de la traction électrique par câble souterrain.** — Le devis suivant, dû à M. Kapp, se rapporte à une installation utilisant le système souterrain à prise de courant directe de M. Lineff, § 622. On a supposé une ligne à double voie de 5 kilo-

mètres, sur laquelle roulent 14 voitures à la vitesse de 11 kilomètres à l'heure. On admet un trafic de 500 000 voitures-kilomètres par an.

| | | |
|---|---|---|
| Canal souterrain . . . . . . . . . . . . . | fr. | 300 000 |
| Conducteur . . . . . . . . . . . . . . | » | 75 000 |
| Chaudières, moteurs, transmissions, etc. . . . | » | 87 500 |
| Dynamos, tableaux de distribution, etc. . . . | » | 37 500 |
| Voitures complètes, à 8 750 fr. l'une. . . . . | » | 122 500 |
| Divers . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 27 500 |
| Total : | fr. | 650 000 |

Dépenses d'exploitation annuelles :

| | | |
|---|---|---|
| Charbon, eaux, huile, etc. . . . . . . . . | fr. | 27 500 |
| Salaires, y compris ceux des conducteurs . . . | » | 50 000 |
| Entretien du canal et du conducteur, à 5 pour cent | » | 18 750 |
| Entretien des voitures, à 1 750 fr. l'une. . . . | » | 24 500 |
| Entretien des moteurs, à 7 1/2 pour cent. . . . | » | 6 600 |
| Entretien du matériel électrique fixe, à 10 pour cent . . . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 3 750 |
| Direction et frais généraux . . . . . . . . | » | 24 000 |
| Total : | fr. | 155 100 |

Cette somme contient le salaire des conducteurs et l'entretien des voitures. En déduisant ces postes, la somme restante, afférente exclusivement à la traction électrique, est réduite à 100 000 fr. Le prix de la traction par voiture-kilomètre est donc de 20 centimes, sans compter l'intérêt et l'amortissement des installations.

**634. — Prix de la traction sur les chemins de fer électriques. —** Il serait prématuré d'indiquer des prix de traction relatifs aux chemins de fer électriques, car la seule exploitation de ce genre est celle du *City and South-London Railway*, ouverte à la fin de l'année 1890. Néanmoins, nous dirons, à titre de renseignement, que MM. Mather et Platt, de Manchester, ont entrepris cette exploitation à raison de 0,20 fr. par kilomètre, pour des trains de 100 voyageurs. Les résultats de l'exploitation ont été si avantageux, que plusieurs lignes semblables sont en construction à Londres.

# TÉLÉGRAPHIE (1).

## THÉORIE.

635. — **Définitions.** — Parmi les applications industrielles de l'électricité, la première en date est la télégraphie, qui a pour objet la transmission de la pensée à l'aide de signaux. Depuis plus de cinquante ans, les inventeurs ont exercé leur sagacité dans cette branche importante de l'activité moderne. Aussi, les appareils sont-ils arrivés à un tel degré de perfection que les nouveaux progrès deviennent de plus en plus difficiles à réaliser. Dans beaucoup de cas, cette perfection est obtenue au moyen de combinaisons mécaniques très compliquées, dont la description détaillée nous entraînerait hors du cadre de cet ouvrage. Nous nous bornerons à insister sur le jeu électrique des appareils. Nous ne nous attarderons pas à décrire les systèmes télégraphiques qui ne présentent qu'un intérêt rétrospectif.

Un système télégraphique comprend un *transmetteur*, appareil destiné à fournir les signaux électriques transmis par la ligne

(1) BLAVIER, *Nouveau traité de télégraphie électrique.*
CULLEY, *Manuel de télégraphie pratique.*

à un *récepteur* situé au poste correspondant. Si l'on veut correspondre dans les deux sens, il faut placer dans chacun des postes un transmetteur et un récepteur, qu'on met alternativement ou simultanément en communication avec la ligne.

Tous les récepteurs actuellement employés transforment l'énergie électrique en travail mécanique, de sorte que la combinaison du transmetteur et du récepteur constitue une application, à un but déterminé, de la transmission de la puissance mécanique.

Eu égard à la nature de ce but, on sacrifie généralement le rendement de la transmission à la rapidité de transmission des signaux, qui constitue l'objectif en vue.

**636.— Propagation des signaux électriques sur les lignes.** — Dans tous les systèmes télégraphiques, on produit au moyen du transmetteur des émissions de courant déterminant des ondes électriques qui sont transmises par la ligne au récepteur. Il convient que les ondes se propagent autant que possible sans déformation, afin de reproduire avec netteté les signaux envoyés. Ce résultat s'obtient facilement sur les lignes aériennes, mais sur les longs câbles où la capacité joue un rôle important, il n'en est pas de même.

Quand on ferme le circuit d'une pile sur une longue ligne souterraine ou sous-marine, on constate que le courant n'atteint pas instantanément à l'extrémité de la ligne l'intensité normale. Ainsi, quand on envoie un courant sur le câble transatlantique reliant l'Irlande à Terre-Neuve, on ne parvient, au moyen des galvanomètres les plus sensibles, à déceler les premières traces de courant à l'arrivée que 0,2 seconde après l'envoi du signal. Après 0,4 seconde le courant atteint les 0,7 du courant normal. Ce n'est qu'après 3 secondes que le régime permanent peut être considéré comme établi. Ce retard est particulièrement dû à ce que le câble, constituant un condensateur cylindrique, se charge aux dépens de l'électricité fournie par la pile, § 195. Les réactions dues à la self-induction du câble retardent également l'établissement du régime, mais cet effet est négligeable devant le premier dans les lignes sous-marines.

Les facteurs principaux influant sur le courant $i$ pendant la période variable sont : la durée $t$ de l'envoi du signal, la capa-

cité C de la ligne, la résistance R de celle-ci et la force électromotrice E de la pile.

Donc

$$i = f(t, C, R, E).$$

Appliquons avec M. Vaschy le principe d'homogénéité à la détermination de cette fonction, § 8. Le second membre ne peut contenir que des quantités homogènes à une intensité ou des facteurs sans dimensions. La forme

$$i = \frac{E}{R}\varphi\left(\frac{t}{CR}\right) = I\varphi\left(\frac{t}{CR}\right)$$

obéit à cette condition ; I représente l'intensité du courant de régime.

Lord Thomson a trouvé qu'en effet $\frac{t}{CR}$ est le seul paramètre variable dans l'expression de l'intensité du courant reçu à l'extrémité de la ligne ; c'est à dire que sur deux lignes la valeur du courant atteint le même tantième de l'intensité normale après des temps $t$ et $t'$ tels que

$$\frac{t}{t'} = \frac{CR}{C'R'}.$$

En d'autres termes, *la durée de la période variable sur diverses lignes est proportionnelle au produit de la capacité par la résistance du conducteur.* Pour des câbles de même composition, on voit donc que *la durée de la période variable est proportionnelle au carré de la longueur de la ligne.* Sur les longs câbles, on ne peut atteindre à chaque signal le régime permanent, mais on cherche à obtenir un tantième déterminé du courant normal, dépendant de la sensibilité du récepteur.

Il résulte aussi de ce qui précède que la vitesse $v$ avec laquelle on peut envoyer des courants d'une intensité déterminée sur une ligne est inversement proportionnelle au carré de la longueur $l$ de celle-ci ainsi qu'à sa résistance $r$ et à sa capacité $c$ kilométriques.

$$v = \frac{k}{l^2 cr}.$$

Suivant la théorie de Lord Thomson [1], la forme du courant reçu à l'extrémité d'un câble est donnée par le diagramme de la

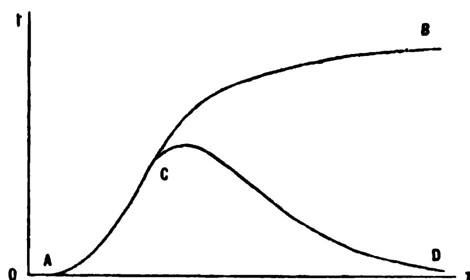



Fig. 392.

fig. 392, dans lequel les ordonnées représentent les intensités et les abscisses les temps comptés à partir de la fermeture du circuit. Le courant ne commence qu'après un certain intervalle de temps, puis il croît, rapidement d'abord, et tend vers une asymptote dont l'ordonnée représente le courant de régime.

Cette forme peut être vérifiée expérimentalement en disposant un galvanomètre enregistreur à l'extrémité d'un câble. On peut répéter l'expérience dans les laboratoires en constituant un câble artificiel formé de bobines de résistance, sur lesquelles on échelonne des condensateurs placés en dérivation.

Si l'on veut obtenir la loi du courant reçu dans le cas où, après un temps $t'$, la pile est brusquement retirée du circuit au poste de départ et où la ligne est mise à la terre à ce poste, il suffit de supposer qu'on superpose à la force électromotrice E une force électromotrice — E qui l'annule. Celle-ci produit un courant donné par

$$-\frac{E}{R}\,\varphi\left(\frac{t-t'}{CR}\right),$$

qui se superpose au premier pour donner le courant résultant

$$i=\frac{E}{R}\left[\varphi\left(\frac{t}{CR}\right)-\varphi\left(\frac{t-t'}{CR}\right)\right].$$

---

(1) W. Thomson, *Philosophical Magazine*, 1856.

Le diagramme du courant résultant est obtenu en retranchant des ordonnées de la première courbe les ordonnées d'une courbe identique reculée vers la droite d'une longueur $t'$. On trouve de cette manière la courbe descendante de la fig. 392. Elle se raccorde à la courbe montante pour figurer l'onde électrique reçue à l'extrémité de la ligne.

Il est facile de voir que la durée de cette onde est plus considérable que la durée du signal transmis, laquelle est représentée par l'abscisse du point de soudure des deux courbes. La forme de l'onde reçue serait bien plus allongée encore si, au lieu de mettre la ligne sur terre après l'envoi du courant, on l'isolait au poste de transmission, car alors toute l'électricité qui charge le câble devrait passer par le poste de réception, au lieu de s'écouler par les deux bouts.

Une onde ainsi allongée rendrait la transmission des signaux extrêmement lente. En effet, si le poste de départ transmettait une succession de courants à des intervalles rapprochés, il est aisé de comprendre que les ondes engendrées se fondraient dans la ligne et parviendraient sous forme d'une onde unique présentant des rides légères.

On peut hâter la décharge de la ligne en envoyant aussitôt après chaque courant un courant réduit de sens inverse. Le flux d'électricité ainsi transmis vient décharger le conducteur et accuser plus nettement les ondes reçues.

Sur les lignes aériennes, dont la capacité kilométrique n'est guère que 0,05 de celle des câbles sous-marins et qui n'atteignent jamais une longueur aussi grande sans postes intermédiaires, les considérations précédentes ont moins d'importance et la vitesse de transmission peut être notablement accrue.

## SYSTÈME TÉLÉGRAPHIQUE MORSE.

637.— **Transmetteur.**— Le télégraphe Morse s'est universellement répandu sur les lignes aériennes, grâce à la simplicité des appareils qu'il met en œuvre. Dans ce système, les lettres, les chiffres et les signes de ponctuation sont représentés par des combinaisons

conventionnelles de points et de barres. La lettre *a* est figurée par un point suivi d'une barre ; la lettre *b* par une barre suivie de trois points, et ainsi de suite. L'alphabet Morse utilisé en Europe présente quelques différences avec celui qu'emploient les Américains.

Les signaux conventionnels sont transmis par l'intermédiaire de courants brefs et de courants longs qu'on envoie par le *manipulateur* représenté dans la fig. 393. Cet appareil se réduit à un levier métallique AB, oscillant autour d'un axe VV' et relevé par un ressort R. En appuyant sur le bouton P, on amène le levier en contact avec le buttoir E. En se relevant, le levier se met en contact avec le buttoir E'.

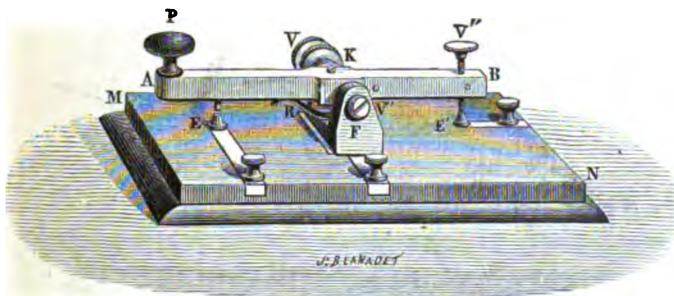



Fig. 393.

Dans chaque poste, le levier mobile est en communication permanente avec la ligne par son support. Le buttoir placé sous le bouton est relié à une pile dont le second pôle est mis à la terre. Le buttoir de repos est également raccordé au sol par l'intermédiaire d'un appareil récepteur. En abaissant la manette, on produit des contacts longs ou brefs suivant le code Morse, et on envoie sur la ligne des courants de durées correspondantes, qui parviennent au récepteur du poste voisin. Les contacts du manipulateur, comme les contacts mobiles de tous les appareils télégraphiques, se font par l'intermédiaire de grains de platine, afin de ne pas être altérés par les étincelles de rupture.

**638. — Récepteur.** — L'appareil récepteur est représenté dans la fig. 394. Il se compose essentiellement d'un électro-aimant en fer à cheval E et d'une armature A portée par un levier qui pivote autour d'un axe *l'*. Deux vis, *v* et *v'*, limitent les excursions du levier *l* de l'armature.

Quand un courant venant de la ligne traverse l'électro-aimant, l'armature est attirée vers le bas et le levier vient frapper contre le buttoir inférieur. Lorsque le courant cesse, le ressort antagoniste R ramène brusquement le levier contre le buttoir supérieur.

Le bruit produit par ces chocs suffit à un employé exercé pour percevoir les signaux transmis.

On a adjoint à l'électro-aimant un enregistreur destiné à faciliter la réception et à conserver une trace des dépêches reçues.

Dans ce but, un mouvement d'horlogerie mû par un ressort et régularisé par un volant à ailettes est enfermé dans une boîte de laiton et entraine une bande de papier par l'intermédiaire d'une sorte de laminoir formé par deux galets *c*, *c'*. Le mouvement d'horlogerie fait ainsi tourner une molette M, laquelle frotte sur un rouleau de feutre T' imbibé d'encre grasse. Au levier de l'armature

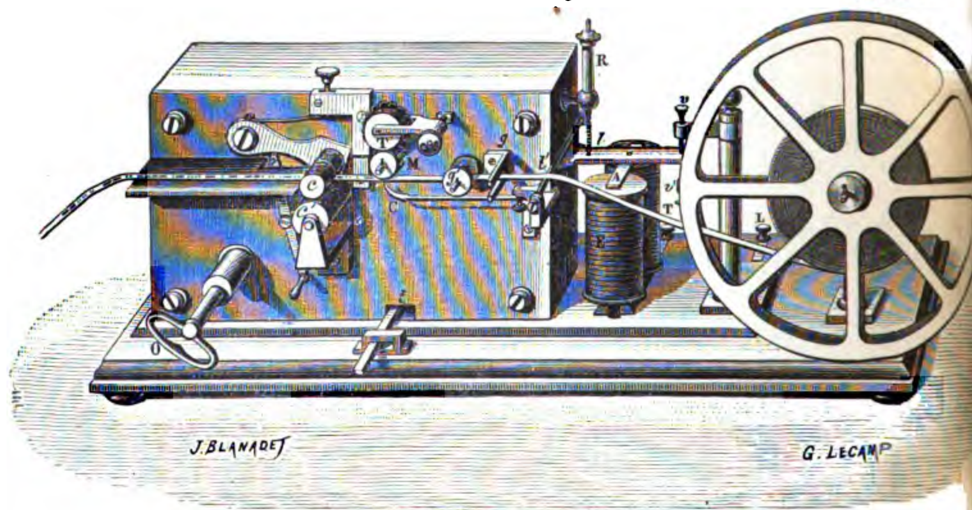


Fig. 394.

est fixée une lame d'acier courbée C qui, lorsque l'armature est attirée, soulève la bande de papier et l'appuie légèrement contre la molette. Celle-ci imprime une trace dont la longueur est en rapport avec la durée du courant : un courant bref produit un *point*, un courant long, une *barre*.

Les signaux envoyés par le poste transmetteur sont ainsi reproduits sur la bande de papier et l'employé du poste récepteur

n'a qu'à traduire les signaux qui se déroulent sous ses yeux. Si, à un moment donné, il s'imprime un signal illisible, l'employé du poste récepteur envoie aussitôt une série de *points*, au moyen de son manipulateur. Par là, il transmet sur la ligne des courants dont une partie, traversant le récepteur du poste correspondant quand le manipulateur de celui-ci est relevé, avertit l'employé de ce poste de cesser la transmission.

Le récepteur comporte trois réglages principaux.

Le buttoir d'en bas *v'* doit être descendu de telle sorte que, dans la position inférieure, l'armature arrive près des noyaux de l'électro-aimant sans toucher ceux-ci. Lorsqu'il y a contact, la force coercitive du circuit magnétique fermé offre une grande résistance au retour de l'armature à sa position de repos.

On tend le ressort antagoniste R proportionnellement à l'aimantation de l'électro-aimant, pour que les mouvements de l'armature soient bien nets.

Enfin, on règle la position du couteau C de manière à ce qu'il presse contre la molette lorsqu'il est relevé, mais sans produire un frottement capable d'arrêter le mouvement du papier.

La clef *o* sert à remonter le ressort actionnant le mécanisme d'horlogerie ; la manette *i* permet d'enclencher ou de déclencher ce mécanisme.

639. — **Parleur.** — Le récepteur peut être réduit à l'électro-aimant et à son armature ; la réception des signaux se fait alors au son et l'appareil porte le nom de *parleur*. La fig. 395 représente un type de parleur.

Les armatures des parleurs sont plus lourdes que celles des enregistreurs, afin d'augmenter l'intensité du son parfois aussi accru par une caisse de résonnance dans laquelle on installe le récepteur et dont l'ouverture est dirigée vers l'opérateur.

La réception au son est généralisée en Amérique et en Angleterre, et tend à se répandre sur le continent.

Les parleurs permettent une grande vitesse de réception : l'employé, écrivant sous la dictée de son correspondant, n'est pas obligé de partager son attention entre une bande portant les caractères Morse et le papier sur lequel il écrit ; de plus, il est forcé de suivre son correspondant, tandis qu'avec la réception à la bande il

peut attendre que la dépêche soit complètement enregistrée avant de la traduire, ce qui cause une perte de temps. Par contre, la

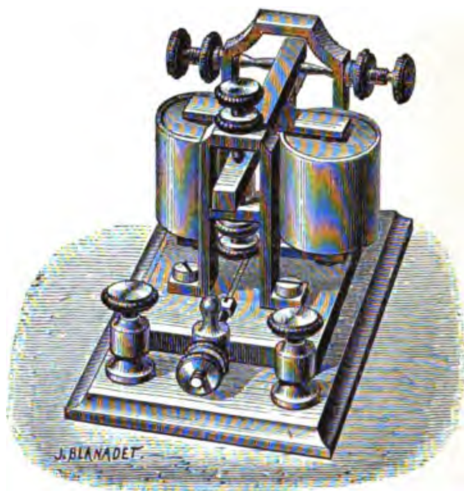



Fig. 395.

réception à la bande est plus facile et exige beaucoup moins d'habileté de la part du télégraphiste. En outre, l'enregistrement des dépêches fournit un moyen de contrôle.

**640. — Relais. Translateurs.** — Les courants transmis sur les lignes télégraphiques n'ont pas, au poste d'arrivée, une intensité suffisante pour attirer l'armature lourde d'un parleur. On installe près de ce dernier un électro-aimant à armature légère appelé *relais*, qui obéit aux courants faibles et relie le parleur à une pile locale. A cette fin, le buttoir inférieur de l'armature du relais communique avec un des pôles de cette pile et le pivot de l'armature avec l'autre pôle par l'intermédiaire du parleur.

Les lignes de très grande longueur sont partagées en plusieurs sections. Aux postes intermédiaires, on dispose des relais doubles appelés *translateurs,* qui permettent de correspondre dans les deux sens, comme on s'en rendra compte en suivant les connexions de la fig. 396. Le nombre d'éléments de pile employé sera proportionnel à la résistance de la ligne sur laquelle le courant de relais est envoyé.

En disposant un nombre suffisant de postes de relais, on pourrait correspondre directement entre deux postes extrêmement éloignés. Mais la transmission devrait être très lente. Il faut remarquer, en effet, que le courant fourni par un relais est en retard, sur le courant qui actionne ce dernier, du temps nécessaire pour que l'armature effectue son excursion. Les deux courants cessant en

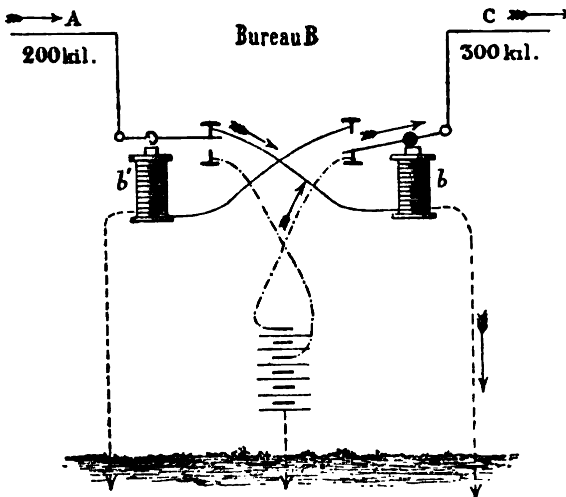



Fig. 396.

même temps, il s'ensuit que les signaux sont raccourcis. Sur les lignes comprenant plusieurs sections, cet effet se répète à chaque relais, de sorte que la diminution de durée des courants devient très sensible à l'extrémité de la ligne et oblige d'allonger beaucoup les signaux transmis.

641. — **Relais polarisés.** — D'après les observations générales présentées à l'occasion de l'étude du magnétisme, il est aisé de se rendre compte que les relais précédents ne se prêtent pas à l'obtention de signaux rapides et réguliers. Si nous supposons, en effet, les noyaux à l'état neutre, les premières traces de courant n'exercent aucun effet attractif par suite de l'inflexion à l'origine de la courbe du magnétisme. Si, au contraire, l'électro-aimant a été traversé par un courant, il conserve une quantité de magnétisme remanent variable avec l'état de stabilité du noyau, les vibrations pouvant éliminer l'aimantation acquise.

On conçoit que ces circonstances amènent des irrégularités dans l'action d'appareils destinés à obéir à des courants faibles ; aussi est-il désirable de placer les noyaux dans des conditions d'aimantation initiale constante. C'est là le but des électro-aimants pola-

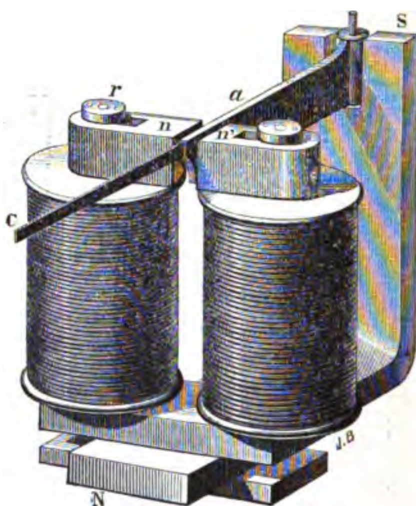



Fig. 397.

risés, dans lesquels les noyaux reçoivent d'un aimant permanent une aimantation très supérieure à l'aimantation remanente que peut occasionner le courant. Ainsi les noyaux reviennent toujours au même état magnétique.

Le relais Siemens, représenté dans les fig. 397 et 398, est l'un des relais polarisés les plus usités. Les deux bobines de l'électro-aimant sont placées debout sur l'un des pôles d'un aimant permanent en équerre, N S. Il se forme deux pôles N dans les talons qui terminent les noyaux. Le courant traversant les bobines accroît l'aimantation de l'un des noyaux et diminue celle de l'autre.

Sur la branche verticale de l'aimant coudé oscille, entre deux buttoirs, une armature en fer doux qui prend une polarité inverse de celle des pièces polaires. Chacune de ces dernières attire par conséquent l'armature et cela avec une force d'autant plus grande qu'elle en est plus rapprochée.

Il y a une position d'équilibre instable, correspondant sensiblement à l'axe de symétrie de l'appareil, dans laquelle l'armature est

également sollicitée dans les deux sens. On peut, au moyen des vis de réglage A, B, disposer les extrémités des buttoirs de deux manières différentes : 1° du même côté de l'axe de symétrie; 2° de part et d'autre de cet axe.

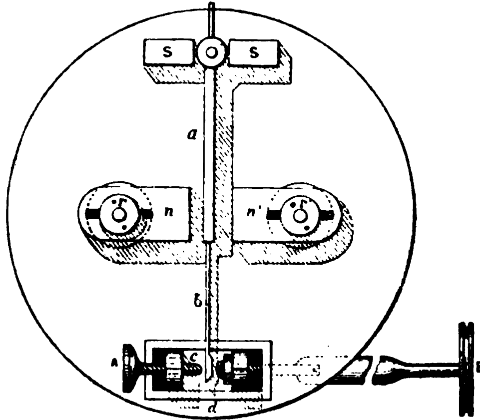



Fig. 398.

Dans le premier cas, l'armature est appuyée au repos contre le buttoir *c* le plus écarté de l'axe. Pour l'amener contre le buttoir opposé, en communication avec la pile de relais, il faut envoyer dans ce dernier un courant tel que l'aimantation du noyau *n'* soit accrue, celle du noyau *n* diminuée. Un courant de sens contraire ne déplace pas l'armature. Par conséquent, l'appareil réglé de cette manière n'agit que pour des courants d'un seul sens, déterminé par la liaison du relais avec la ligne. La position des talons *n*, *n'* est d'ailleurs variée suivant l'intensité du courant de travail.

Au contraire, avec la seconde disposition des buttoirs, l'armature peut obéir aux courants de l'un et l'autre sens, à condition toutefois qu'ils se succèdent alternativement; car une fois l'armature amenée par un courant contre l'un des buttoirs, il faut nécessairement un courant inverse pour l'en détacher. On a recours à cette disposition lorsque, comme dans certains systèmes télégraphiques que nous étudierons dans la suite, on correspond par courants alternés, courants de travail suivis de courants de repos de sens contraire.

**642. — Résistance des électro-aimants télégraphiques.** — On a vu, au § 154, la manière dont on calcule un électro-aimant destiné à fournir la plus grande force attractive possible sous l'influence d'un *courant permanent*. Tel n'est pas le cas des courants télégraphiques qui sont essentiellement variables. Dans les signaux rapides, l'état permanent n'est jamais atteint; il convient de proportionner les électro-aimants de manière que, pendant la durée d'un signal, ils développent une force attractive aussi grande que possible ou, en d'autres termes, que le produit du nombre de spires par l'intensité du courant atteigne une valeur maxima.

L'intensité du courant s'élèvera à une fraction d'autant plus grande de l'intensité de régime que la constante de temps des bobines magnétisantes sera plus faible, § 176. Par suite de la forme complexe des ondes télégraphiques, le problème est d'une résolution beaucoup plus difficile que s'il s'agissait de courants harmoniques simples; heureusement, la grande expérience acquise dans l'emploi des électro-aimants fournit des règles empiriques très utiles dans la construction de ces organes. La résistance donnée aux électro-aimants est une fraction de celle de la ligne; plusieurs praticiens adoptent le rapport un tiers entre ces résistances.

Souvent un même récepteur doit desservir plusieurs lignes. Il est donc utile qu'on puisse faire varier la résistance de l'électro-aimant, afin de le mettre en rapport avec les résistances parfois très différentes des diverses lignes. On peut faire les combinaisons suivantes : 1° insérer une seule bobine à la suite de la ligne; dans ce cas l'électro-aimant est dit *boiteux;* 2° placer les deux bobines en série; 3° les disposer en dérivation.

La self-induction de l'électro-aimant monté en dérivation n'est que le quart de la valeur correspondant au montage en série, ce dont on peut se rendre compte en supposant les deux bobines superposées. Or, la résistance totale du circuit comprenant la ligne et la pile n'est pas très notablement altérée par le changement du couplage. Il en résulte que la constante de temps dans le premier cas n'est guère supérieure au quart de la valeur relative au second cas. Mais l'aimantation qui correspond au régime permanent n'est, dans le premier cas, pour un même courant de ligne, que la moitié de ce qu'elle est dans le second. Néanmoins, comme la courbe du courant s'élève beaucoup plus rapidement dans la première hypo-

thèse, il se peut que, pour des signaux très courts, l'aimantation à la fin d'un signal soit dans ces conditions plus grande que dans la seconde hypothèse.

L'expérience a montré qu'il est utile d'adopter des noyaux aussi courts que possible, l'épaisseur donnée à l'enroulement étant approximativement égale au diamètre du noyau. Le fer employé dans la construction de ces derniers doit être très doux et bien recuit.

En vue d'éviter l'affaiblissement de l'effet du courant de travail dû aux courants de Foucault, il serait bon de diviser le noyau. Dans quelques appareils on fait usage de noyaux tubulaires fendus longitudinalement, afin de réduire les courants parasites.

M. Vaschy indique les données suivantes pour les électro-aimants des appareils Morse usités, en France, sur les lignes de longueurs moyennes.

Résistance des 2 bobines : 500 ohms; self-induction de chaque bobine enlevée des noyaux : 1,65 quadrant; self-induction des bobines montées en série sur leurs noyaux : 6,37 quadrants; self-induction des mêmes bobines lorsque l'armature est appliquée sur les noyaux et que le circuit magnétique est ainsi fermé : 10,68 quadrants.

Cette variation de la self-induction peut apporter des perturbations dans l'établissement du courant. On peut considérer à cet égard comme un avantage la disposition du relais Siemens, dans lequel la palette ne réunit pas les deux noyaux et où les variations de la self-induction pendant les mouvements de l'armature sont très réduites, étant donnée la faible masse de cette dernière. Il convient d'ailleurs de donner aux armatures des relais un moment d'inertie faible afin de leur permettre d'obéir rapidement aux forces qui les sollicitent.

643. — **Générateurs employés.** — Les courants télégraphiques Morse varient entre 0,01 et 0,015 ampère. Comme les lignes ont environ 10 ohms par km, il s'ensuit qu'une ligne de 100 km présentera avec le récepteur environ 1 500 ohms de résistance et que la pile devra posséder une force électromotrice de 15 à 25 volts. On emploie des éléments Leclanché dans la plupart des postes. On n'utilise les piles au sulfate de cuivre que dans les bureaux ayant un trafic très actif et où l'on craint un affaiblissement trop rapide du courant.

Une même pile peut desservir plusieurs lignes, si sa résistance intérieure est faible comparée à celle des lignes combinées et si les éléments ne sont pas amenés à débiter un courant anormal.

Il existe des bureaux où tous les éléments sont groupés entr'eux suivant le montage dit en *pyramide*. Supposons, par exemple, que les lignes les plus courtes exigent 20 volts, les lignes moyennes 50 volts et les lignes les plus longues 100 volts. On formera des séries de 20 éléments Daniell et on mettra autant de séries semblables en dérivation qu'il est nécessaire pour fournir le courant maximum absorbé par toutes les lignes à un moment donné. On met en tension avec le premier groupe un second groupe de 30 éléments en série et d'autant d'éléments en dérivation qu'il convient pour produire le courant absorbé par les lignes de grandes et de moyennes longueurs. Enfin, un dernier groupe placé au sommet de la pyramide renferme autant de séries dérivées de 50 éléments en tension qu'en exigent les lignes les plus étendues. On réunit alors la base de la pyramide à la terre, le premier tronçon de 20 éléments en série aux lignes courtes, le second tronçon de 30 éléments en série aux lignes moyennes et le sommet de la pyramide aux lignes étendues.

Dans les grands centres, l'emploi des piles entraîne des frais excessifs et l'on y a substitué depuis quelques années celui des dynamos fournissant le courant soit directement, soit par l'intermédiaire d'accumulateurs destinés à régulariser le débit des machines. On donne aux dynamos des voltages appropriés aux divers groupes de lignes et l'on a soin d'introduire à la suite de chaque dynamo des résistances de sûreté destinées à empêcher le courant de devenir excessif en cas de court-circuit. A Chicago, par exemple, les résistances additionnelles sont comptées à raison de 2 ohms par volt fourni par la dynamo correspondante.

**644. — Appareils accessoires. Commutateurs. Galvanoscopes. Sonneries. Parafoudres.** — Indépendamment des manipulateurs et des récepteurs, un bureau télégraphique comprend différents appareils auxiliaires : commutateurs, galvanoscopes, sonneries d'avertissement et parafoudres.

Le *commutateur à manette* est d'un emploi très fréquent, fig. 399. Il comprend un levier qu'on manœuvre à l'aide d'une manette et

qu'on peut amener successivement sur une série de blocs en cuivre disposés à la périphérie d'un disque isolant au centre duquel pivote le levier. Ce dispositif permet de relier un fil aboutissant

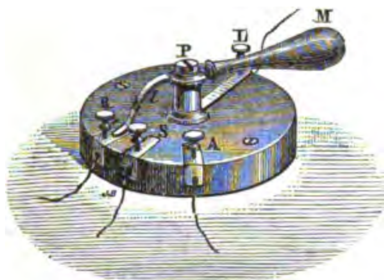



Fig. 399.

à l'axe du levier successivement à d'autres fils attachés aux blocs de cuivre.

Le *commutateur à broches* est formé de plots en cuivre qu'on peut réunir à l'aide de broches insérées entr'eux. C'est le système de commutateur usité avec les caisses de résistance.

Le *commutateur suisse* permet un très grand nombre de combinaisons. C'est un commutateur à broches de forme particulière

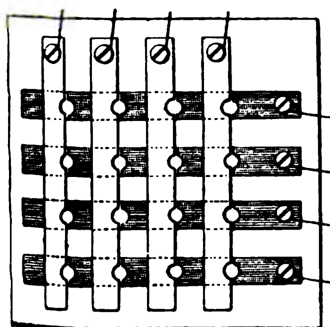


Fig. 400.

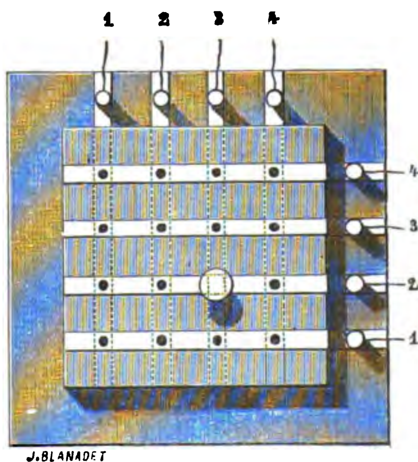



Fig. 401.

dont les fig. 400 et 401 représentent deux dispositifs. Une planche verticale porte deux séries orthogonales de barres en laiton soi-

gneusement isolées les unes des autres. Les lames verticales sont, par exemple, reliées aux lignes qui aboutissent au bureau télégraphique, les barres horizontales aux appareils qui y sont installés. Pour réunir deux lames, on place une broche à leur point de croisement. On peut ainsi relier : 1° une ligne avec un appareil, par une broche connectant les barres correspondantes ; 2° deux fils aboutissant au même bureau ; il suffit de réunir les lames verticales auxquelles les lignes sont attachées à une même lame horizontale isolée ; 3° deux appareils du bureau, par la liaison de deux barres horizontales au moyen d'une barre verticale.

Pour assurer un bon contact entre les barres et les broches, on fend généralement ces dernières par un ou deux traits de scie de manière à former ressort quand elles sont enfoncées.

Dans le dispositif de la fig. 400, où les deux pièces à réunir sont apparentes, on peut juger avec plus de certitude que dans l'autre dispositif de l'efficacité des contacts.

Les *galvanoscopes* permettent aux employés de s'assurer que les courants qu'ils envoient sont suffisants pour actionner les récepteurs des postes correspondants et inversement que les courants reçus suffisent aux récepteurs.

Ces appareils sont de la construction la plus simple. Souvent l'aiguille aimantée pivote autour d'un axe horizontal et est lestée de manière à prendre normalement la position verticale, ce qui facilite les lectures.

Les *avertisseurs* sont des appareils destinés à annoncer l'envoi d'une dépêche par un poste transmetteur. On fait généralement usage de la sonnerie trembleuse, imaginée par Lippens, dans laquelle une armature d'électro-aimant portant le battant d'un timbre ouvre et ferme alternativement le circuit de la ligne. Le buttoir est porté par un ressort, dans le but de prolonger la durée du contact et d'amortir les chocs de l'armature.

Pour éviter que les décharges atmosphériques ne viennent brûler les appareils et blesser les employés, on installe des *parafoudres* à l'entrée des lignes dans les bureaux.

Les appareils les plus employés sont les parafoudres à feuille de papier ou à pointes, § 478.

**645. — Installations des postes télégraphiques.** — Dans les *postes extrêmes* où convergent généralement des lignes nombreuses, celles-ci aboutissent aux lames verticales d'un commutateur suisse. Ces lames sont séparées par une feuille de papier paraffiné d'une

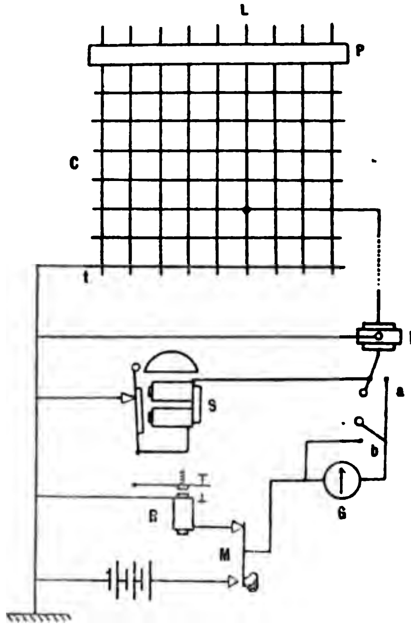



Fig. 402.

plaque transversale P reliée à la terre, de manière à constituer un parafoudre. Les appareils du bureau communiquent avec les barres horizontales du commutateur.

Normalement, un commutateur à manette relie la ligne à la terre par l'intermédiaire d'une sonnerie. Lorsqu'un appel arrive d'un poste correspondant, la ligne est mise en communication, avec le manipulateur M et le récepteur R, par le déplacement de la manette. On peut mettre le galvanoscope dans le circuit ou le supprimer. Le récepteur est alors prêt à recevoir la dépêche. Celle-ci terminée, la ligne est remise sur terre à travers la sonnerie.

En temps d'orage, toutes les lignes sont mises à la terre par une lame spéciale du commutateur suisse.

Dans un *poste intermédiaire* intercalé dans une ligne, les deux tronçons de celle-ci aboutissent à deux lames d'un commutateur à broches portant un parafoudre et une lame de terre. Les deux premières lames sont reliées à des sonneries. Lorsqu'un appel est reçu de l'une des directions, on met le tronçon correspondant en relation avec le récepteur et l'on reçoit les signaux transmis.

Considérons une ligne renfermant 5 postes intermédiaires A, B, C, D, E. Chacun de ces postes est désigné par une combinaison de 2 ou 3 lettres, constituant l'abréviation télégraphique du nom de la station.

Supposons que le poste B ait une dépêche pour C. Il relie la section BC à son manipulateur par le moyen des manœuvres indiquées ci-dessus et envoie les signaux formant l'abréviation du poste C. Ce dernier, averti par le bruit de la sonnerie correspondante, relie la section BC à son récepteur, entend l'appel et reçoit la dépêche, après avoir envoyé quelques points à l'aide de son manipulateur pour annoncer qu'il est prêt. Lorsque la transmission est terminée, le poste C répète les chiffres et les mots difficiles de la dépêche, afin d'écarter toute chance d'erreur. Cela fait, on rétablit les communications normales.

Si le poste B veut communiquer avec un poste éloigné tel que E, il prévient d'abord C en transmettant l'abréviation de E. Le poste C, après avoir entendu cet appel par son récepteur, met les tronçons BC et CD en communication directe par une broche placée au commutateur d'entrée. L'appel est ensuite reçu par D qui relie, à son tour, les sections CD et DE. Enfin E entend l'appel et reçoit la dépêche. Après un temps déterminé, les postes intermédiaires rétablissent les communications normales, à moins qu'ils ne s'aperçoivent que la dépêche n'est pas terminée.

**646. — Réseau télégraphique. Systèmes par communications directes et par communications indirectes.** — Dans quelques pays peu étendus, tels que la Belgique, le système d'appels successifs est généralisé sur tout le territoire. Le *réseau télégraphique* qui couvre le pays comprend des *lignes directes*, qui relient les bureaux principaux, et des *lignes omnibus*, qui passent par tous les petits postes intermédiaires.

Dans les postes principaux, on peut relier directement entr'elles

les lignes qui aboutissent aux commutateurs suisses et mettre ainsi en relation deux stations qui demandent à échanger une dépêche. On laisse toutefois, dans le circuit, un appareil, galvanoscope ou parleur, destiné à déceler la fin de la transmission.

Si les lignes sont très longues, on peut établir la communication par l'intermédiaire d'un translateur, § 640.

Un petit poste quelconque A peut communiquer avec un autre petit poste B situé à l'extrémité du pays. Grâce à des raccordements successifs, A transmettra l'abréviation conventionnelle de B et fera relier entr'eux les tronçons de la ligne omnibus qui l'unit au poste plus important le plus voisin. La ligne omnibus est alors connectée à la ligne directe qui pénètre dans un poste principal. De là, par l'intermédiaire d'autres lignes directes, on réunit A au poste le plus voisin de B. Enfin une ligne omnibus permettra d'atteindre cette dernière station, et A et B échangeront la dépêche.

Ce système, dit par communications directes, exige que chaque poste ait une pile suffisante pour communiquer à une distance relativement grande. De plus, chaque communication immobilise les lignes intermédiaires pendant le temps assez long nécessité par les appels successifs et la transmission de la dépêche. Ces inconvénients croissent avec l'étendue du réseau.

Par contre, dans le système des communications directes, la dépêche n'est transmise qu'une seule fois, ce qui réduit la main-d'œuvre et les chances d'erreur au minimum.

Dans les grands pays, les communications sont toujours indirectes. Le poste A envoie la dépêche au poste principal voisin, qui la reçoit *en passage*. Ici se fait une nouvelle transmission vers un bureau principal voisin de B, lequel reçoit la dépêche de ce dernier poste. Ces transmissions successives nécessitent une main-d'œuvre considérable et peuvent occasionner des erreurs.

647. — **Transmission à courant continu.** — Dans le système Morse exposé précédemment et généralisé en Europe, le circuit des piles est ouvert à l'état de repos et les courants ne sont envoyés qu'au moment de la transmission des dépêches; d'où le nom de transmission par courants intermittents donné à ce système.

Aux États-Unis et sur quelques lignes de chemin de fer européennes, les postes successifs d'une ligne omnibus sont parcourus à

l'état normal par un courant, d'où le nom de transmission à courant continu.

La fig. 403 donne le schéma d'une ligne comprenant 3 postes montés d'après ce dispositif. Les piles sont groupées dans les postes extrêmes et leur circuit est normalement fermé par l'intermédiaire de récepteurs et de manipulateurs de construction spéciale.

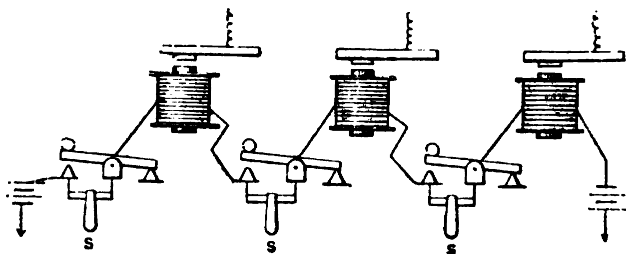



Fig. 403.

Ces derniers présentent une broche S qui permet de maintenir le courant sur la ligne. Les armatures des récepteurs sont donc abaissées à l'état de repos. Si l'un des postes de la série désire transmettre une dépêche à un autre poste, il retire la broche S de son manipulateur et envoie, à l'aide de ce dernier, l'abréviation du bureau appelé. Les signaux sont reçus simultanément dans toutes les stations. Lorsque le bureau appelé a répondu, la dépêche est transmise, puis le circuit est rétabli.

Ce système évite l'intervention des postes non intéressés dans les communications. Il facilite l'envoi des dépêches destinées à tous les bureaux à la fois, comme c'est fréquemment le cas pour les télégrammes de service sur les lignes de chemin de fer. De plus, il concentre les piles dans les postes extrêmes plus importants en général, où l'on peut disposer d'un personnel spécial pour leur entretien. Enfin, les courants étant relativement constants, le réglage des appareils ne doit pas être changé fréquemment. Par contre, ce système entraîne une dépense de courant assez grande et exige des piles pouvant supporter un courant continu. Il n'est applicable qu'aux lignes omnibus et exclut le système des communications directes.

**648. — Méthode d'essai par courants reçus.** — Avant de commencer le travail journalier dans un poste télégraphique, il

est utile de s'assurer que les lignes et les appareils correspondants sont en bon état. Un moyen simple est utilisé, en Angleterre et en Belgique, dans ce but. Tous les postes ayant des lignes convergeant vers un bureau principal doivent, à des moments déterminés et différant de quelques minutes, envoyer à l'aide de leur manipulateur et de leur pile de travail un courant continu vers le poste central. Ces courants sont reçus successivement dans un galvanomètre étalonné et leurs intensités sont notées en milliampères. Si un courant n'a pas l'intensité normale, on procède, après la série des mesures, à des essais spéciaux, afin de vérifier si l'insuffisance est due à un défaut d'isolement de la ligne, à la fatigue de la pile du poste de transmission ou à d'autres causes.

Ces essais journaliers sont excellents pour vérifier la décroissance graduelle des courants et juger du moment où il convient de procéder à l'entretien des lignes et des piles.

649. — **Avantages et inconvénients du système Morse.** — Le système télégraphique Morse dont il a été question jusqu'ici offre l'avantage de n'exiger que des appareils simples et robustes, partant faciles à régler et peu sujets à se déranger. Par contre, l'on peut reprocher à ce système son faible effet utile et l'emploi d'un alphabet conventionnel, qui exige une traduction sujette à erreurs.

Le système Morse ne permet guère de transmettre plus de 25 mots par minute avec la réception à la bande. Ce chiffre ne représente qu'une faible fraction de la capacité de transmission d'un fil télégraphique. Lorsque le nombre de mots à transmettre est plus grand, il faut, si l'on veut conserver le système Morse simple, établir de nouveaux fils, ce qui constitue une grosse dépense, surtout sur les lignes de grande longueur. Il est préférable de recourir à des systèmes télégraphiques perfectionnés permettant de mieux utiliser les fils existants.

## SYSTÈMES TÉLÉGRAPHIQUES PERFECTIONNÉS.

650. — **Classification.** — Ces systèmes peuvent être divisés en deux catégories.

Dans les systèmes de la première catégorie, l'utilisation meilleure des lignes est obtenue par des combinaisons électriques qui permettent de relier différents transmetteurs et récepteurs à un même fil et d'envoyer simultanément plusieurs dépêches sur la ligne. Ces systèmes sont désignés sous le nom générique de ***multiplex***. En les décrivant, nous supposerons que les appareils employés sont du type Morse. Mais il faut remarquer qu'ils s'appliquent à d'autres appareils, tels que ceux de Hughes et de Wheatstone.

Dans les systèmes de la seconde classe, l'amélioration de l'effet utile des lignes est due à l'emploi d'appareils basés sur des combinaisons mécaniques qui permettent une transmission rapide. Celle-ci résulte d'une réduction du nombre des signaux nécessaires pour représenter les caractères typographiques (télégraphe Hughes), ou d'un accroissement du nombre de signaux émis par unité de temps (télégraphes Wheatstone, Baudot).

Avant d'aborder l'étude des systèmes multiplex, nous dirons quelques mots d'une classe spéciale de télégraphes.

**651. — Appareils autographiques.** — Ces appareils permettent la reproduction de l'écriture et du dessin. Étudié et réalisé sous une forme pratique par Caselli, le système autographique a été perfectionné par MM. Meyer et d'Arlincourt. Voici le principe de l'appareil Caselli.

Deux pointes de fer situées, l'une $p$ au poste de transmission, l'autre $p'$ au poste de réception, sont animées de mouvements alternatifs parfaitement synchroniques, de manière à décrire deux systèmes identiques de lignes parallèles très rapprochées, en glissant sur des plateaux métalliques. Le plateau du poste de transmission porte une feuille d'étain sur laquelle est écrite, avec de l'encre grasse isolante, la dépêche à transmettre ; celui du poste de réception est muni d'une feuille de papier, imbibée d'une solution aqueuse de ferro-cyanure de potassium.

Les styles $p$ et $p'$ sont reliés à la ligne, les plateaux à la terre ; en outre, les pôles de la pile de transmission sont réunis à la pointe $p$ et à la feuille d'étain correspondante. Tant que ces dernières sont directement en contact, la pile se trouve en court-circuit, et aucun courant appréciable ne parcourt la dérivation formée par la ligne. Mais quand le style de transmission $p$ passe sur un caractère tracé

à l'encre isolante, le court-circuit est rompu, et la pile envoie un courant vers le récepteur. Pendant toute la durée du passage, le style $p'$ décompose le sel imprégnant le papier et laisse une trace de bleu de Prusse. Le trait ainsi formé est donc identique à celui que décrit le style de transmission sur la ligne d'encre grasse qu'il rencontre; de plus, à cause du synchronisme parfait des mouvements, les deux traits sont semblablement placés sur les deux feuilles. Cela étant, on comprend aisément qu'on obtient au poste de réception une reproduction par *hachures* de la dépêche ou du dessin tracé au poste de transmission.

Caselli réalisait des mouvements synchroniques en attachant les deux styles $p$ et $p'$ à des pendules aussi identiques que possible et qui, à chaque oscillation, étaient réglés par un courant électrique spécial.

Les appareils autographiques sont très lents; ils sont beaucoup plus compliqués et, par suite, plus délicats et plus coûteux que les appareils Morse, dont ils atteignent à peine l'effet utile. Aussi sont-ils restés des curiosités scientifiques. Ils pourraient cependant rendre des services dans des cas spéciaux, aux armées en campagne, par exemple, parce qu'ils permettent de transmettre des plans.

## SYSTÈMES TÉLÉGRAPHIQUES REPOSANT SUR DES COMBINAISONS DE COURANTS.

**652. — Duplex différentiel.** — Les systèmes de la première catégorie sont appelés: 1° *duplex*, lorsqu'ils permettent l'envoi simultané de deux dépêches en sens opposés ; 2° *diplex*, lorsque les deux dépêches sont transmises en même temps dans le même sens ; 3° *quadruplex*, quand deux dépêches passent dans un sens pendant que deux autres dépêches passent en sens opposé.

Dans le duplex différentiel, on enroule en sens inverses sur l'électro-aimant du récepteur Morse des nombres égaux de spires réunies au point d'entrée. Un courant arrivant par le bout commun se bifurque en deux dérivations qui tendent à provoquer des aimantations contraires du noyau. Un tel électro-aimant est dit *différentiel*, parce que l'intensité de ses pôles est déterminée par la

différence des actions des courants traversant les deux circuits de l'enroulement.

Soient, fig. 404, deux postes télégraphiques pourvus d'électro-aimants différentiels A, *a*.

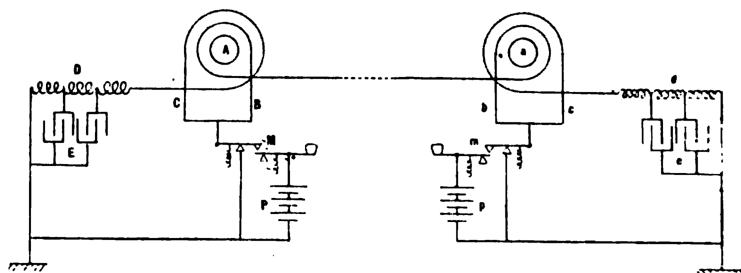


Fig. 404.

M, *m* représentent des manipulateurs Morse à double levier. Dans ces appareils, la communication avec la terre est supprimée *au moment* où se produit la liaison avec la pile. Le circuit n'est jamais interrompu, comme cela a lieu avec le manipulateur ordinaire pendant le temps que le levier met à passer du buttoir de repos au buttoir de contact.

Supposons que l'employé du poste de gauche transmet seul. Le courant fourni par la pile de ce poste se divise en deux parties à l'entrée de l'électro-aimant A. Une partie retourne au pôle négatif de la pile à travers le rhéostat D; l'autre passe sur la ligne, traverse l'un des circuits de l'électro-aimant *a*, puis se rend à la terre par le manipulateur *m* au repos.

On voit que, contrairement à ce qui a lieu dans le système Morse ordinaire, les courants transmis passent dans l'électro-aimant du poste de départ; on évite qu'ils agissent sur l'armature de cet appareil en débouchant au rhéostat D une résistance égale à celle de la ligne, augmentée de celle du fil de l'électro-aimant *a* traversé par le courant. Alors les courants circulant dans les deux circuits de l'électro-aimant différentiel A sont égaux entr'eux et le noyau ne s'aimante pas. Quant à l'électro-aimant du poste correspondant, il s'aimante par le courant venant de la ligne ; l'armature est attirée et le signal enregistré.

Pour régler son appareil, l'employé transmetteur envoie une

série de signaux et fait varier la résistance du rhéostat jusqu'à ce que l'armature de son récepteur n'obéisse plus aux courants qu'il transmet.

L'employé du poste voisin procède de même par tâtonnements pour déterminer la résistance qu'il doit déboucher au rhéostat *d*, afin que les courants qu'il émet n'influencent pas son récepteur *a*.

Lorsque les appareils ont été ainsi réglés, les deux postes peuvent télégraphier simultanément par le fil de ligne unique. C'est ce qu'il est facile de vérifier. Pour plus de simplicité, nous supposerons que les deux piles ont la même force électromotrice et qu'elles sont reliées à la terre par les pôles de même nom. Dans ce cas, au moment où les deux manipulateurs sont abaissés simultanément, les deux extrémités de la ligne se mettent au même potentiel par raison de symétrie, et la ligne n'est parcourue par aucun courant. Mais les courants dérivés vers la terre, à travers les rhéostats, continuent à passer dans les deux postes : les noyaux s'aimantent, les armatures sont attirées et les signaux s'impriment.

Cela étant, supposons que les deux postes commencent à transmettre en même temps, M un point vers *a*, et *m* une barre vers A. Tant que les deux manipulateurs sont abaissés, un signal s'enregistre aux récepteurs des deux postes; on remarquera que l'électro-aimant de chaque poste est aimanté par le courant émis par le poste même, car la ligne n'est pas traversée par un courant. Lorsque le manipulateur M se relève après l'envoi du point Morse, une partie du courant qu'émet encore *m* passe sur la ligne et va finir la barre commencée dans A, tandis que *a* devient inactif.

On vérifiera facilement que le système fonctionne également lorsque les piles sont reliées à la ligne par des pôles de noms contraires.

On a adopté un manipulateur de forme spéciale, de préférence au manipulateur ordinaire, parce que pendant l'interruption des communications occasionnée par ce dernier, il pourrait se produire un faux signal.

La figure montre deux condensateurs E, *e*, dérivés par rapport aux résistances D, *d*. Le rôle de ces appareils, dont la nécessite sur les longues lignes a été démontrée par Stearns, est de faire équilibre à la capacité du conducteur. Au moment de l'abaissement de M, par exemple, un courant de charge passe en effet sur la ligne; si un

courant équivalent ne traverse pas la branche différentielle de l'électro-aimant A, un faux signal se produira.

En d'autres termes, on voit que la ligne doit être équilibrée par une ligne artificielle D E, tant au point de vue de sa résistance qu'à celui de sa capacité.

**653. — Duplex par la méthode du pont de Wheatstone.** — Il est facile de se rendre compte que les méthodes de réduction à zéro, entr'autres le pont de Wheatstone, se prêtent comme la méthode différentielle à une combinaison duplex.

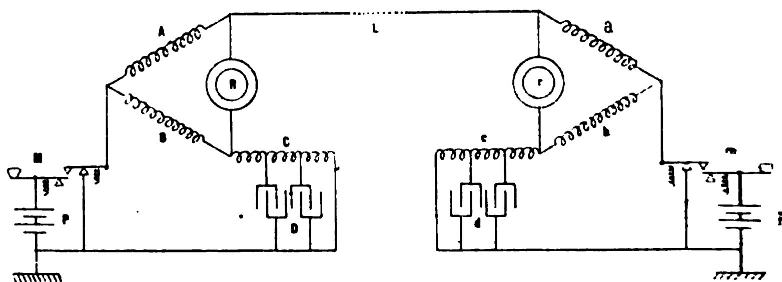


Fig. 405.

Supposons qu'en chaque poste on établisse un pont de Wheatstone dont trois côtés A, B, C soient constitués par des rhéostats et le quatrième par la ligne et les installations de l'autre poste, de résistance $l$. Dans une des diagonales, on installe le récepteur R, dans l'autre, le manipulateur et la pile.

Les résistances sont choisies de telle manière qu'on ait

$$\frac{A}{B} = \frac{l}{C}.$$

A cette condition, l'abaissement du manipulateur M ne produit pas d'effet sur le récepteur R du même poste, tandis que le courant envoyé sur la ligne actionne le récepteur $r$ du poste correspondant. Un réglage analogue est effectué à cette dernière station.

La capacité de la ligne doit d'ailleurs être équilibrée par des condensateurs D, $d$ variables, ajustés par tâtonnements.

Par ces dispositions, on satisfait aux conditions nécessaires et suffisantes pour correspondre en duplex, à savoir : les deux récep-

teurs sont placés en circuit de telle manière qu'ils ne soient pas influencés par les signaux du poste auquel ils appartiennent, mais bien par les signaux du poste correspondant.

La méthode de transmission en duplex par le pont de Wheatstone demande, comme la méthode différentielle, l'emploi de manipulateurs ne provoquant pas d'interruptions du circuit. Elle a l'avantage de ne pas exiger d'électro-aimants spéciaux aux récepteurs, ce qui la fait généralement préférer à la combinaison différentielle.

Rien n'empêche d'établir un des postes d'après la méthode différentielle et le poste correspondant d'après la méthode du pont.

**654. — Diplex Edison.** — Pour transmettre simultanément deux dépêches dans le même sens, on installe à l'un des postes deux

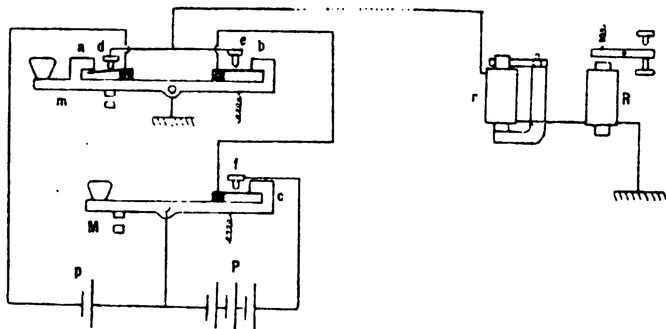



Fig. 406.

manipulateurs *m*, M, et à l'autre poste deux relais de réception *r*, R, disposés en série.

Le problème à résoudre exige que les signaux envoyés par *m* soient enregistrés par *r*, ceux envoyés par M par R, et cela, que les manipulateurs *m* et M transmettent séparément ou simultanément.

Voici le principe de la solution de M. Edison. *r* est un relais à électro-aimant polarisé, obéissant à des courants faibles et de sens déterminé, que nous appellerons courants positifs. R est un relais simple, dont l'électro-aimant est réglé de manière à ce que l'armature ne s'abaisse que sous l'influence de courants relativement intenses.

Les manipulateurs employés portent des ressorts fixés à des blocs d'ébonite et susceptibles de se mettre en contact soit avec des vis *d*, *e*, *f*, soit avec des talons *a*, *b*, *c*, selon la position des leviers.

En abaissant le manipulateur *m*, on relie le pôle négatif de la petite pile *p* avec la terre par le talon *a* et l'axe du levier *m*, tandis que le pôle positif de cette pile communique avec la ligne par l'intermédiaire de l'axe de M, du talon *c*, des ressorts *f* et *e* et de la vis *e*. Le relais polarisé *r* fonctionne donc seul grâce au faible courant positif fourni par *p*. Si l'on abaisse le manipulateur M seul, le pôle négatif de *p* est mis en relation avec la ligne, tandis que le pôle positif de la pile P en série avec *p* est relié à la terre par l'intermédiaire de l'axe du manipulateur *m*. Un courant négatif intense passe donc sur la ligne et actionne le relais R seul.

Enfin si les deux manipulateurs sont abaissés simultanément, c'est le pôle négatif extrême qui est connecté au sol, tandis que le pôle positif extrême envoie sur la ligne un courant positif intense qui agit à la fois sur les deux relais.

655. — **Quadruplex Edison.** — Le système précédent trouve peu d'applications, car il est rare que le trafic télégraphique ait lieu tout entier dans un même sens ; mais, en combinant ce dispositif avec le duplex par le pont de Wheatstone étudié antérieurement, on arrive à transmettre simultanément deux dépêches dans un sens et deux autres en sens inverse, c'est à dire à former un *quadruplex*, fort en usage aux États-Unis.

## SYSTEMES TÉLÉGRAPHIQUES REPOSANT SUR DES COMBINAISONS MÉCANIQUES.

656. — **Télégraphe Hugues.** — Le *manipulateur* du télégraphe Hughes fait corps avec le récepteur. Il comprend une boîte cylindrique B sans fond, dont le couvercle présente des trous disposés suivant une circonférence. A travers ces trous peuvent être soulevés des goujons *g* lorsqu'on appuie sur des touches *t*, dont l'ensemble constitue un clavier. Chaque touche correspond à une lettre de l'alphabet.

Au dessus de la boite à goujons tourne un arbre V portant un manchon M. Un levier *q* mobile autour d'un axe et relevé par un ressort *d* appuie contre le rebord supérieur du manchon. Son axe communique avec la ligne par l'intermédiaire de l'électro-aimant récepteur E. Par un buttoir de repos, il relie normalement la ligne à la terre. L'arbre V porte une pièce N articulée sur un bras coudé.

Si, pendant sa révolution, la pièce N rencontre un goujon saillant sur la boite B, elle abaisse le manchon M, fait basculer le levier *q*, rompant ainsi la communication de la ligne avec la terre pour relier la pile P à la ligne. Un courant traverse alors à la fois les électro-aimants des deux appareils correspondants.

*Mécanisme de réception.* Chaque appareil est muni d'une roue R, dite roue des types parce qu'elle porte sur sa circonférence des caractères typographiques enduits d'encre grasse à l'aide d'un tampon. Comme le montre la fig. 407, le mouvement de cette roue est solidaire de celui de l'arbre V.

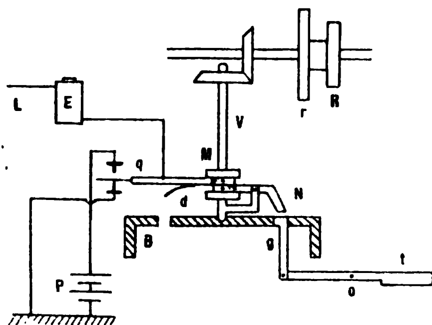



Fig. 407.

Les roues des types des deux appareils en relation tournent synchroniquement de manière qu'à chaque instant la même lettre se trouve à la partie inférieure de chacune d'elles, en même temps que les pièces N passent sur les goujons correspondant à cette lettre.

Si, au poste de transmission l'un des goujons, celui qui correspond à la lettre A par exemple, est soulevé, le jeu des électro-aimants amène dans chacun des appareils une bande de papier

contre la partie inférieure de la roue des types, de sorte que la lettre considérée s'imprime aux deux postes.

*L'électro-aimant* qui détermine l'impression est polarisé, fig. 408. Les noyaux des bobines sont plantés sur les pôles d'un aimant en fer à cheval et terminés par des talons rapprochés. Sur ces talons appuie, à l'état normal, une armature *m* en fer doux pivotant autour d'un axe *o* et qu'un ressort *n*, réglable par une vis, tend à

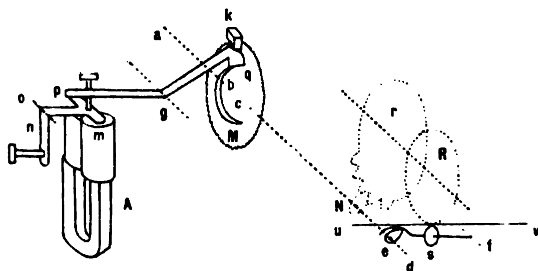



Fig. 408.

soulever. Le courant traversant les bobines de l'électro-aimant dans un sens convenable a pour effet de diminuer l'aimantation et, par conséquent, la force portante des noyaux, de sorte que l'action du ressort devient prépondérante et relève l'armature.

L'électro-aimant Hughes permet de produire un effort mécanique notable au moyen d'un courant faible. Supposons que la force portante de l'aimant soit de 1 kg ; le ressort antagoniste peut être tendu de manière à développer un effort de 0,9 kg sur l'armature sans soulever cette dernière. Dans ces conditions, un courant capable de réduire d'un peu plus que 0,1 kg la force portante des noyaux provoquera l'arrachement de l'armature. L'effort de soulèvement est très faible au premier instant, mais dès que l'armature est détachée des noyaux, cet effort acquiert une valeur rapidement croissante. Il suit de là que l'armature de l'électro-aimant Hughes peut, soit exercer un grand effort, soit, si l'on n'oppose qu'une faible résistance à son déplacement, obéir très rapidement à l'action du courant. Mais une force étrangère est nécessaire pour ramener l'appareil à la position normale.

Le soulèvement de l'armature fait basculer un levier *pq*, mobile autour d'un axe *g*.

*Mécanisme imprimeur*. L'appareil comprend un arbre *ad*, appelé

axe des cames et divisé en deux parties indépendantes. L'arrière *ab* est animé d'un mouvement de rotation continu, extrêmement rapide. Cette partie est munie d'une roue de rochet M à dents très fines. L'avant *cd* de l'axe des cames est normalement immobile. Il est relié à un rochet *k* qui est soulevé par le talon du levier *pq*. Lorsque ce levier bascule par suite du passage du courant, le rochet tombe sur la roue M et oblige *cd* à participer au mouvement de *ab*. Le bout de *cd* porte un excentrique qui relève automatiquement le levier *pq*, de manière qu'après une révolution de l'axe le levier est ramené à sa position de repos et le rochet à nouveau dégagé. Ainsi l'armature revient au contact des pôles de l'électro-aimant.

Voyons ce qui se passe pendant cette révolution de *cd*. Cet arbre présente une came *e* qui, dans son mouvement, applique brusquement contre la roue des types R la bande de papier *u v;* celle-ci est appuyée sur un cylindre *s*, fixé à un levier mobile autour d'un axe *f;* la came *e* agit sur l'extrémité de ce levier. La lettre s'imprime ainsi au vol pendant la rotation de la roue des types.

Ces divers mouvements se font presque instantanément de sorte qu'au moment même où le goujon correspondant à une lettre envoie le courant, cette lettre s'imprime dans les deux appareils.

La plus grande difficulté était d'obtenir le *synchronisme* dans les deux postes en correspondance. M. Hughes a muni dans ce but le mécanisme d'un régulateur très sensible. M. Van Rysselberghe a employé récemment avec succès un régulateur conique rigoureusement isochrone et qui a l'avantage de ne pas vibrer comme celui de M. Hughes. Mais quelle que soit la sensibilité et la constance des régulateurs, il se produit inévitablement dans les rotations des deux roues des types de légers écarts qui doivent être corrigés.

M. Hughes a remédié à ces défauts de synchronisme par une correction ingénieuse opérée à chaque envoi de courant. La roue des types n'est pas calée sur son axe, mais elle est entraînée par frottement en même temps qu'une roue dentée *r*, appelée roue correctrice, fig. 407 et 408.

Au moment où l'axe *cd* se met en mouvement, une came N s'engage entre deux dents de la roue correctrice dans chacun des appareils en relation. Cet engrènement fait avancer ou reculer la roue des types de l'appareil de la station réceptrice, de manière à

lui faire occuper la même position relative que celle du mécanisme de la station de départ. Pour que ce réglage soit efficace, il faut toutefois que l'avance ou le retard ne soit pas supérieur à la moitié de l'intervalle entre deux dents de la roue correctrice. On estime qu'un signal au moins doit être envoyé par tour de la roue correctrice pour que cet écart maximum soit sûrement évité.

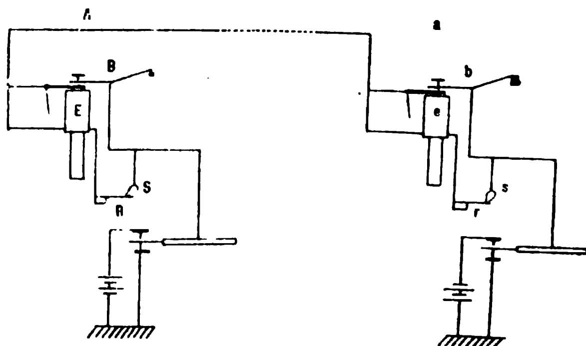



Fig. 409.

La fig. 409 montre le *diagramme des connexions* établies dans les deux postes correspondants. Les piles sont reliées à la terre par les pôles de noms contraires, afin que les courants qui traversent les électro-aimants aient le sens convenable pour déclencher les armatures de ceux-ci. On peut d'ailleurs renverser le sens du courant dans les bobines des électro-aimants au moyen d'un commutateur inverseur non représenté, afin de ne pas compliquer la figure.

Au moment où un signal est transmis par le poste A, le courant traverse l'électro-aimant E en passant par un ressort R pressé par une troisième came S portée par l'axe des cames. Le courant traverse également *e*, *r*, *s* et arrive à la terre par le manipulateur du poste *a*.

Afin de ne pas laisser inutilement la résistance de l'électro-aimant E en circuit, lorsque son armature a basculé, celle-ci, en touchant le levier B, établit une dérivation de courant qui met les bobines en court-circuit.

Lorsque l'armature est ramenée contre les pôles de l'électro-aimant par le jeu du levier B, il nait dans les bobines une force électromotrice d'induction. Cette dernière tend à provoquer un courant qui, en vertu de la loi de Lenz, aurait pour effet de

repousser l'armature et d'occasionner une nouvelle excursion de cette dernière. La came S a pour but de s'opposer à cette éventualité. Pendant la révolution de l'axe *cd*, cette came quitte le ressort R au moment précis où l'armature est ramenée contre les pôles. Les bobines ont ainsi leur circuit interrompu au moment de la production de la force électromotrice d'induction signalée.

Dans le télégraphe Hughes, l'envoi d'une lettre n'exigeant qu'une seule émission de courant, il en résulte un effet utile plus que double de celui de l'appareil Morse. De plus, l'impression des lettres expose à moins d'erreurs, puisqu'elle supprime la traduction de dépêches transmises en caractères conventionnels. Par contre, l'appareil est coûteux, d'un réglage difficile, et demande un long apprentissage de la part des employés.

**657. — Télégraphe à transmission automatique de Wheatstone.** — Wheatstone a apporté un grand perfectionnement au télégraphe Morse en substituant la transmission mécanique à la transmission manuelle. Cette dernière est lente et donne lieu à des erreurs provenant de signaux irréguliers, tels que des barres Morse trop courtes ou des points trop longs, envoyés par des agents fatigués ou distraits. Dans le télégraphe Wheatstone, on prépare la transmission au moyen d'un *perforateur* à l'aide duquel on perce dans une bande en papier fort trois rangées de trous, fig. 410.

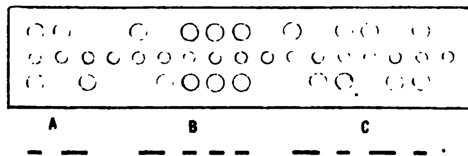



Fig. 410.

Les trous des deux rangées extrêmes représentent par leur combinaison les signaux Morse : deux trous superposés correspondent à un point, deux trous placés obliquement à une barre. Aucune confusion n'est ainsi possible. Plusieurs employés peuvent être occupés à ce travail et préparer des bandes qui passent ensuite rapidement dans un transmetteur automatique, de manière à utiliser toute la capacité de réception de la ligne.

Le *transmetteur* entraîne la bande de papier *ab*, par une roue étoilée E dont les dents engrènent avec les trous de la rangée centrale, au dessus de deux aiguilles *c*, *d* placées sous les rangées extrêmes de trous. Ces aiguilles sont animees d'un mouvement de va et vient vertical extrêmement rapide communiqué par un balancier oscillant K. Dans ce but, le balancier porte des goupilles M, N qui dans leurs excursions viennent appuyer sur des bras *e*, *f* articulés d'un côté avec les aiguilles et mobiles autour de leurs

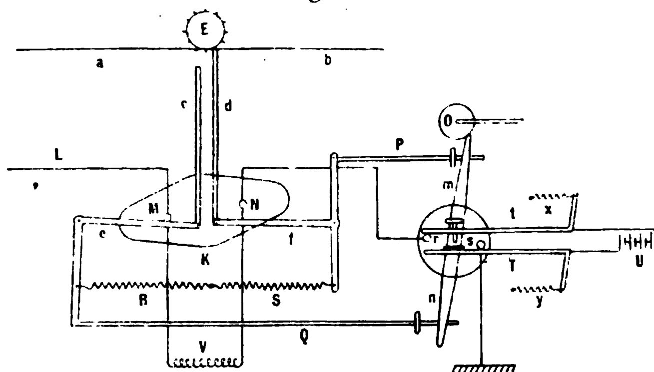



Fig. 411.

extrémités opposées. Les ressorts R, S tendent à soulever ces bras. Lorsqu'une aiguille telle que *d* rencontre le papier, elle est arrêtée dans son mouvement ascensionnel et abandonne la goupille N qui poursuit sa course. Si, au contraire, l'aiguille *d* trouvait un vide dans le papier, elle continuerait son mouvement, le bras *f* serait soulevé et la tringle P articulée avec un appendice de ce dernier irait pousser le levier *m* d'un commutateur inverseur. Le galet O a pour but de maintenir le levier *m* dans la position acquise.

Si c'est l'aiguille *c* qui pénètre dans l'autre rangée de trous, le bras *e* est soulevé, la tringle Q pousse le levier *n* et incline le commutateur en sens inverse.

Le commutateur comporte deux plaques métalliques semi-circulaires, isolées l'une de l'autre. Ces plaques communiquent l'une avec la ligne L par l'intermédiaire d'une résistance V, l'autre avec la terre. Elles portent des goupilles *r*, *s*, sur lesquelles appuient des leviers *t*, T rappelés par des ressorts *x*, *y* et reliés aux pôles d'une pile U. On voit que, lorsque l'aiguille *d* traverse

le papier, un courant négatif est envoyé sur la ligne; si l'aiguille *c* rencontre un orifice de l'autre rangée, la ligne est parcourue par un courant positif.

Le *récepteur* du télégraphe Wheatstone se compose d'un électro-aimant E à noyaux séparés, entre les extrémités desquels oscille une double armature A A polarisée par un aimant N S, fig. 412; quand un courant positif traverse les bobines de l'électro-aimant, les palettes sont déplacées dans un sens et pour un courant négatif, elles se portent du côté opposé. L'armature dirige une molette encrée qu'elle amène, dans une de ses excursions, contre une bande de papier pour y imprimer un signal semblable à ceux des récepteurs Morse. Un courant opposé détache la molette et termine le signal.

On remarquera que, dans cette forme d'électro-aimant, le circuit magnétique est ouvert; la self-induction est partant faible et la durée de la période variable est réduite, § 176.

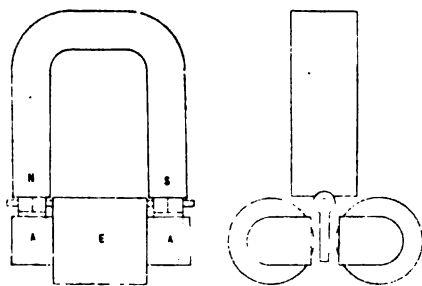



Fig. 412.

Ces dispositions étant comprises, voyons comment s'opère la transmission. Que la bande passant dans le transmetteur présente deux trous superposés ou deux trous placés obliquement, le jeu initial des organes est le même. L'aiguille *c*, qui envoie des courants positifs, s'élève au dessus de la bande de papier en traversant l'ouverture qui lui correspond; un courant est lancé sur la ligne, l'armature du récepteur quitte le buttoir de repos et porte la molette encrée contre la bande de papier du récepteur; un signal commence à s'imprimer. L'aiguille *c* descend; néanmoins l'armature du récepteur reste appuyée contre le buttoir de travail et l'impression continue. Cette situation dure jusqu'à ce que l'aiguille

*d*, trouvant à son tour passage au travers du papier, envoie sur la ligne un courant de sens contraire qui ramène l'armature contre le buttoir de repos. Si les trous sont superposés, les mouvements ascensionnels des deux aiguilles se succèdent immédiatement, le signal imprimé est très court : on obtient un point Morse. Si, au contraire, les trous sont disposés obliquement sur la bande, un certain temps s'écoule avant que l'aiguille *d* puisse traverser le papier, le signal imprimé est long : on obtient une barre.

Un employé peut perforer environ 30 à 40 mots par minute, et la vitesse du transmetteur peut être réglée de manière à envoyer de 120 à 130 mots par minute. On voit donc que l'appareil est capable de transmettre les dépêches préparées par trois ou quatre employés, ce qui fournit un excellent effet utile de la ligne. A l'arrivée, la bande de papier est partagée également entre trois ou quatre agents, qui traduisent les caractères Morse.

Un effet utile aussi élevé n'est possible que sur les lignes dont la capacité n'est pas trop élevée ; nous avons vu, en effet, que cet élément tend à déformer les signaux en fondant ceux-ci les uns dans les autres. C'est en vue de retarder autant que possible cette confusion des signaux que M. Culley a imaginé l'interposition d'une résistance V, dite de *compensation*, entre les goupilles M et N du transmetteur.

On a vu, § 636, que la transmission par courants alternés est favorable à la décharge de la ligne, mais, pour que les ondes reçues soient régulières, il faudrait que les courants aient la même durée. Ce n'est pas le cas pour les signaux Morse.

Supposons, par exemple, que la résistance V soit nulle. Un point Morse correspond à un courant positif suivi immédiatement d'un courant négatif. Une barre Morse correspond à un courant positif allongé qui charge la ligne au point que la décharge occasionnée par le courant négatif peut ne pas être suffisante et que l'impression de la barre peut être allongée par suite de la décharge du fil à travers le récepteur.

Admettons, à présent, que la résistance V soit infinie; dans ce cas les goupilles M et N reliées à la ligne et à l'inverseur de courant ne communiquent plus que par les ressorts R, S et les bras *e*, *f*, fig. 411. Lorsqu'un de ceux-ci, tel que *f*, est arrêté dans son

ascension, la ligne est interrompue. Dans ces conditions, si deux trous obliques passent dans le transmetteur, l'ascension de l'aiguille *c* détermine un courant positif, mais celui-ci est aussitôt interrompu parce que l'aiguille *d* ne rencontrant pas de perforation dans le papier abandonne la goupille N en ouvrant le circuit de la pile. Il en résulte, que la ligne se charge peu et que le courant négatif, occasionné par la pénétration de *d* dans un trou du papier, a une tendance à détacher trop rapidement l'armature du récepteur et à raccourcir la barre enregistrée.

C'est pour éviter ces extrêmes qu'une résistance V, réglée par tâtonnements, est insérée entre les goupilles. Lorsque celles-ci ne communiquent plus par les bras *e*, *f* et que le courant ne peut plus passer directement sur la ligne, ainsi que cela a lieu au début du tracé d'une barre, l'électricité traverse la résistance V et il arrive sur la ligne un courant *affaibli* ayant pour effet d'entretenir un état de charge convenable du conducteur.

Les mêmes raisonnements s'appliquent aux intervalles des signaux pendant lesquels passent des courants négatifs qui peuvent être longs ou courts. Ces courants de repos traversent pendant les intervalles longs la résistance de compensation, ce qui empêche la déformation du signal dû à l'envoi d'un courant positif.

658. — **Télégraphes multiples.** — Une classe d'appareils particulièrement étudiés en France comprend les télégraphes multiples mécaniques. Ces télégraphes permettent, comme les systèmes multiplex électriques que nous avons examinés précédemment, de desservir plusieurs appareils de transmission et de réception par un même fil. Seulement les appareils, au lieu d'être intercalés d'une manière permanente dans le circuit de la ligne, sont mis périodiquement en communication avec celle-ci. Les signaux constituant les différentes dépêches ne sont pas transmis *simultanément*, mais passent *successivement* sur la ligne.

Voici le principe des télégraphes multiples. La ligne se termine à chacune de ses extrémités par un frotteur animé d'un mouvement circulaire rapide sur un disque appelé *distributeur*; les deux frotteurs tournent synchroniquement. Les disques sont divisés en secteurs isolés, au nombre de six par exemple, et chacun des secteurs d'une des stations est en relation avec un manipulateur,

tandis que le secteur correspondant de l'autre station communique avec un récepteur. On forme ainsi six groupes télégraphiques distincts, dont chacun n'est complété par la ligne que lorsque les frotteurs passent sur les secteurs qui lui correspondent.

Le système repose donc sur la division du temps. Chaque employé n'a la ligne à sa disposition, pour transmettre le signal qu'il a préparé, que pendant une fraction du temps nécessaire pour une révolution des frotteurs. Un timbre avertit l'employé que le signal a passé.

Le télégraphe multiple le plus perfectionné est celui de M. Baudot. Chacun des secteurs du distributeur porte, au poste de transmission, fig. 413, cinq contacts métalliques, 1, 2, 3, 4, 5, en relation

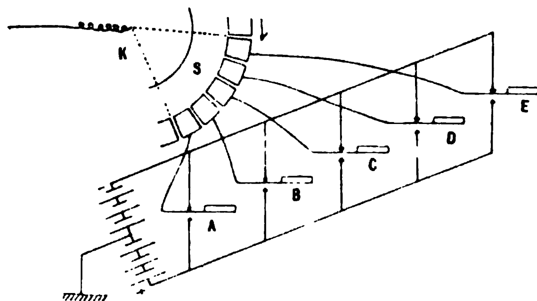



Fig. 413.

permanente avec l'un des pôles de la pile, de sorte qu'à chaque passage du frotteur sur le secteur, il se produit cinq envois de courant sur la ligne. On peut changer le sens de ces courants au moyen des cinq touches d'un clavier reliées aux cinq contacts du secteur. Les diverses combinaisons qu'on peut former par l'abaissement de ces touches représentent les lettres de l'alphabet et les chiffres. Par exemple, pour transmettre la lettre *a*, il suffit d'appuyer sur la touche E; on provoque par là l'émission d'un courant de sens déterminé, positif par exemple, et de quatre courants négatifs, c'est à dire que la lettre *a* est représentée par la combinaison

$$+ - - - -.$$

Au poste de réception, chacun des blocs d'un secteur du distributeur, fig. 414, est relié à un électro-aimant polarisé, dont l'ar-

mature va se coller contre l'un ou l'autre buttoir, suivant le sens du courant transmis. Ainsi les cinq courants partiels envoyés par le poste de transmission reproduisent la combinaison effectuée à ce

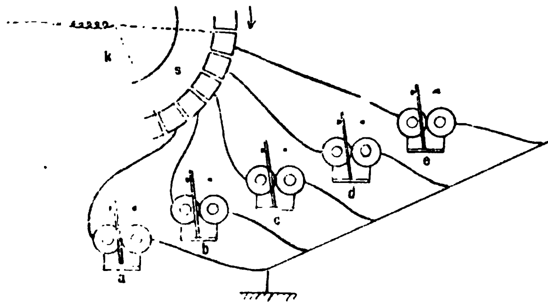



Fig. 414.

poste. Un mécanisme extrêmement ingénieux, mais dont la description sortirait du cadre de cet ouvrage, traduit ces combinaisons en caractères typographiques.

L'appareil Baudot permet de desservir simultanément et par un seul fil plusieurs postes intercalés sur une même ligne. Soient A, B et C trois de ces postes. En disposant dans chacun d'eux des appareils multiples à six secteurs fonctionnant synchroniquement, on peut échanger trois dépêches entre A et C et trois autres dépêches entre A et B, ou bien deux dépêches entre A et C et quatre entre B et C, et ainsi de suite. (1)

Le nombre d'appareils Baudot desservis par un même fil dépend naturellement de l'importance de la ligne. Lorsque le nombre de dépêches à transmettre est relativement faible, on se borne à établir un appareil unique, qui rend à peu près les mêmes services que le télégraphe imprimeur Hughes. Si plus tard le trafic s'accroît, on installe, au fur et à mesure des besoins, de nouveaux appareils qui sont reliés aux secteurs inoccupés du distributeur.

(1) Voir CULLEY, *Traité de Télégraphie ;* traduction française, Gauthier-Villars, Paris.

**659. — Rendement des différents télégraphes. Considérations générales.** — Voici quelques renseignements sur la vitesse de transmission moyenne ou, comme disent les télégraphistes, sur le *rendement* des divers appareils employés actuellement en France. En représentant par 1 le rendement du télégraphe Morse, le rendement du Hughes est 2,4; celui du Wheatstone 3,6; celui du Baudot à 4 claviers 6,6; celui du Baudot à 6 claviers 9,6. Les rendements des appareils Morse, Hughes et Wheatstone sont doublés par la méthode duplex.

Ces résultats montrent que le télégraphe multiple de M. Baudot permet d'obtenir la meilleure utilisation des lignes; de plus, il offre l'avantage de l'impression des signaux en caractères typographiques. Par contre, la complication mécanique de l'appareil rend ce système coûteux à établir, sujet aux dérangements et nécessite la présence permanente de mécaniciens dans les bureaux. L'emploi du système Baudot tend à se répandre en France sur les grandes artères du réseau.

En Angleterre, c'est le télégraphe Wheatstone qui est preféré; tandis qu'aux États-Unis c'est le quadruplex qu'on emploie sur les lignes à grand trafic. Il est à noter que, dans les pays anglo-saxons, on cherche à éviter autant que possible les mécanismes compliqués, d'un entretien difficile.

Si, en regard du rendement des différents appareils télégraphiques, l'on met le nombre des agents nécessaires pour les desservir et entretenir, on trouve que tous les systèmes utilisant le même mode de réception donnent sensiblement le même effet utile par employé. Les appareils imprimeurs fournissent à cet égard un rendement double de celui des appareils à signaux Morse.

Jusqu'à présent, les appareils Morse et Hughes, mis au besoin en duplex, suffisent dans les pays peu étendus, tels que la Belgique. Dans les grands pays, où certaines artères du réseau présentent une longueur très considérable et un trafic très chargé, on utilise des appareils plus rapides.

## TÉLÉGRAPHIE SOUS-MARINE.

**660. — Système télégraphique Thomson et Varley.** — Les récepteurs à électro-aimants peuvent être employés sur les lignes

sous-marines courtes, mais, lorsque la longueur dépasse 600 km, on est obligé d'y renoncer complètement pour les raisons suivantes :

1° Afin d'obtenir des courants d'intensité suffisante pour actionner l'armature d'un électro-aimant, on serait obligé d'employer des piles de force électromotrice trop élevée pour la sécurité de l'isolement des câbles. On cherche en général à ne pas dépasser 10 à 20 volts, pour qu'un léger défaut dans l'enveloppe de gutta-percha ne soit pas rapidement amplifié par le courant.

2° Par suite de la confusion des ondes électriques occasionnée par la capacité du câble, la transmission devrait être extrêmement ralentie et l'utilisation du câble deviendrait insuffisante. C'est ainsi que, lorsqu'on a essayé de transmettre par le système Morse sur le premier câble transatlantique, on n'est pas arrivé à échanger plus d'un mot par minute. Pour que les ondes de courant soient séparées à l'arrivée au point de donner des signaux distincts dans le récepteur Morse, il faut manipuler avec une extrême lenteur.

Lord Thomson et Varley ont imaginé un système télégraphique qui permet la transmission de 15 à 25 mots par minute sur les longs câbles.

Le récepteur est un galvanomètre apériodique à miroir. En pratique, on adopte un galvanomètre à aimant mobile, système Thomson, § 137, pourvu d'un amortisseur à air. Le transmetteur est une clef d'inversion qui permet de lancer sur la ligne des courants alternés qui sont, comme on le sait, favorables à la décharge du câble, § 636.

Les courants émis sont tous d'égale longueur, ce qui est une autre condition favorable. Par convention, une déviation à gauche dans le galvanomètre représente un point Morse; une déviation à droite figure une barre Morse.

Un tel système possède une très grande sensibilité et peut fonctionner avec des courants d'intensité fort réduite. De plus, si même, par suite de la différence entre les intervalles qui séparent les mots et les lettres, les ondes de courant ne sont pas absolument régulières, il est tout au moins possible de discerner au galvanomètre les impulsions de droite des impulsions de gauche, et partant de lire les signaux. L'aiguille suit, en effet, toutes les ondulations du courant d'arrivée, tandis que l'armature d'un

électro-aimant n'obéit au courant qu'à partir du moment où celui-ci a atteint l'intensité suffisante pour vaincre la force antagoniste.

Cependant, ce système télégraphique serait contrarié par les courants telluriques qui circulent sur les câbles et sont généralement plus intenses que les courants de travail. Heureusement que les premiers courants sont très peu variables, sauf en temps d'orage. Varley a eu l'idée d'interposer un condensateur dans la

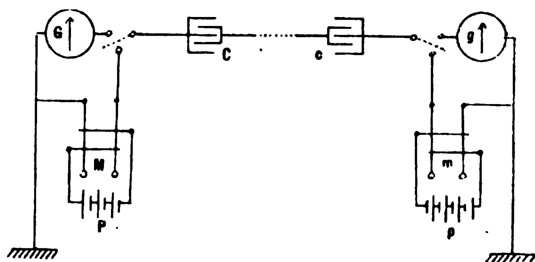



Fig. 415.

ligne à l'entrée de chacun des postes correspondants. Ces condensateurs se chargent sous l'action du courant terrestre et, une fois chargés, interrompent ce courant. Les courants alternés servant aux transmissions provoquent des variations de charge qui déterminent les signaux dans le récepteur.

Outre qu'ils coupent le courant tellurique, les condensateurs donnent plus de netteté aux signaux reçus, car le câble ne peut jamais prendre une charge supérieure à celle qui correspond aux condensateurs en série. Une succession de courants de même sens ne donnera donc au câble qu'une charge déterminée et, par suite, ne pourra pas provoquer dans le récepteur des courants de décharge excessifs.

Les communications sont disposées comme l'indique la fig. 415, où G, C, M représentent respectivement le récepteur à desservir, le condensateur et l'inverseur. Un commutateur permet de relier la ligne à l'inverseur ou au galvanomètre suivant qu'on veut transmettre ou recevoir. De cette manière on ne laisse pas inutilement en circuit, au poste de transmission, le galvanomètre qui possède une résistance considérable.

Les variations lentes du courant terrestre provoquent de légers déplacements du zéro du récepteur, ce qui n'offre pas d'inconvé-

nient pour la lecture des signaux, lesquels se manifestent par des oscillations autour de la position moyenne de l'aiguille.

**661. — Siphon enregistreur (siphon recorder).** — Le galvanomètre à miroir fatigue beaucoup les employés qui doivent suivre les mouvements du faisceau lumineux réfléchi par le récepteur sur un écran. De plus, ce dernier ne conserve pas la trace des signaux. Pour obvier à ces inconvénients, Lord Thomson a imaginé un enregistreur d'une sensibilité suffisante pour obéir aux courants de ligne.

Le galvanomètre récepteur est du même type que l'appareil Deprez et d'Arsonval qu'il a précédé. Une petite bobine est suspendue par un fil F entre les branches d'un fort aimant ou d'un électro-aimant. Le courant arrive à la bobine par des fils minces et souples. Le couple directeur est dû à un bifilaire tendu par des poids P, P. Les oscillations de la bobine sous l'influence

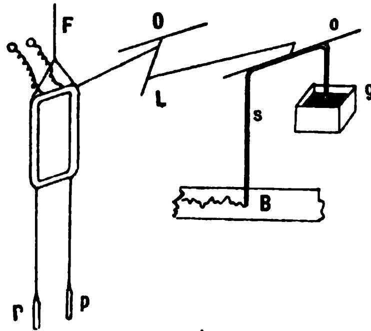
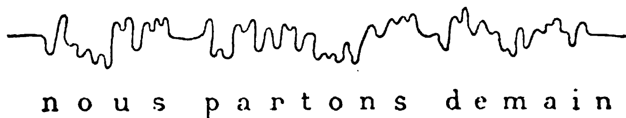



Fig. 416.

du courant de réception occasionnent des déplacements d'un petit siphon en verre S, dont la courte branche plonge dans un godet d'encre *g*, et dont la longue branche se meut devant une bande de papier B animée d'un mouvement de translation. Un système de fils et un levier OL amplifient les mouvements du siphon qui tourne autour d'un fil *o*. Un ressort sert à tendre plus ou moins les fils.

En vue d'éviter le frottement de la grande branche du siphon contre le papier, on éloigne légèrement le tube et l'on électrise l'encre du godet à l'aide d'une sorte de replenisher, § 100. L'encre

électrisée est attirée par le papier et projetée sur ce dernier sous forme de gouttelettes formant des traits pointillés.



n o u s p a r t o n s d e m a i n

Fig. 417.

La fig. 417 représente la réception des mots « *Nous partons demain* » sur un long câble. On voit nettement les déformations occasionnées par l'accroissement de charge amené par des courants successifs de même sens.

**662. — Transmission en duplex sur les lignes sous-marines.** — Les systèmes de réception précédents permettent d'obtenir sur les plus longs câbles une vitesse de transmission presque égale à celle que donne l'appareil Morse sur des lignes aériennes de moyenne longueur. On peut utiliser la disposition en duplex moyennant quelques précautions spéciales que nous allons indiquer, et alors le rendement est doublé.

On a vu que Stearns est arrivé à réaliser des lignes artificielles à l'aide de la combinaison d'un condensateur et d'une résistance. On ne peut toutefois, par ce système, arriver à supprimer les faux signaux sur les longs câbles sous-marins, sur lesquels la durée de la période variable est bien plus longue que celle qu'on peut obtenir sur une ligne artificielle composée d'un seul rhéostat et d'un condensateur.

Le câble constitue un condensateur continu, et la charge est répandue sur toute la longueur du conducteur, au lieu d'être localisée en un point. Pour se rapprocher de ces conditions, on a imaginé différents artifices dont le meilleur est dû à M. Muirhead. Cet inventeur forme un véritable câble artificiel au moyen d'un condensateur de forme spéciale. L'une des armatures est constituée par des zigzag en étain formant un circuit résistant ; les feuilles de l'autre armature sont réunies entr'elles à la manière ordinaire. Le diélectrique est choisi de manière à présenter une charge résiduelle comparable à celle de la gutta-percha qui isole le câble. La période variable peut ainsi être rendue la même dans la ligne véritable et dans la ligne artificielle du duplex.

# TÉLÉPHONIE [1].

## TÉLÉPHONES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

**663. — But. Rappel de principes d'acoustique.** — La téléphonie a pour objet la transmission de la parole à distance. Le jeu des appareils qu'elle emploie est basé, en partie, sur des principes d'acoustique que nous croyons devoir rappeler d'une manière sommaire.

*Propagation du son.* Le son se propage dans les corps par ondes de vibrations longitudinales. Si cette propagation a lieu dans un milieu gazeux, dans l'air par exemple, celui-ci est, en chaque point, alternativement condensé et dilaté, de telle sorte que la courbe des dépressions en fonction du temps présente une forme sinusoïdale. Pendant un certain temps $t$, la pression de l'air est plus grande que la pression normale; puis, pendant le temps $t$ suivant, elle est plus petite.

---

(1) WIETLISBACH, *Traité de Téléphonie industrielle*, traduction Marinovitch, Paris, Tignol.

PREECE et MAIER, *Le Téléphone*, traduction Floren, Paris, Baudry.

La durée $2t$ d'une vibration complète, correspondant à deux ondulations successives et opposées, porte le nom de période.

Si plusieurs sons se propagent simultanément, la dépression en un point déterminé, à un moment quelconque, est la somme algébrique des dépressions dues aux différents sons.

On distingue trois qualités principales dans un son :

1° La *hauteur*, qui dépend du nombre de périodes par seconde. Pour une même note, quel que soit l'instrument qui la produit, la durée d'une vibration complète est toujours la même, 1/435e de seconde, par exemple, pour le *la* du diapason.

2° L'*intensité*, qui est fonction de l'amplitude des vibrations produites et par laquelle un son fort se distingue d'un son faible. Plus l'intensité est grande, plus loin s'entend le son.

3° Le *timbre*, qualité qui nous fait distinguer deux sons de même hauteur émis par des instruments différents. Il est dû à des sons *harmoniques* tenant aux résonnances de diverses parties de l'instrument. Ces notes sont d'amplitude moindre que le son *fondamental* auquel elles se superposent.

La transmission simultanée d'un son et de ses harmoniques peut être comparée, en faisant bien entendu la distinction entre les deux genres d'ondes, à la propagation d'une grande vague dont la surface est ridée par toutes les petites vagues qui s'y ajoutent.

*Production de la parole.* Ce sont les harmoniques qui permettent l'émission de la parole. Celle-ci est due à l'action de l'air projeté par les poumons sur des membranes à tension variable, appelées cordes vocales, disposées au fond du larynx; les cordes vocales donnent le son fondamental, qui peut être le même quelle que soit la lettre de l'alphabet prononcée, et la conformation de la bouche au moment de l'émission du son détermine la production des sons harmoniques caractérisant chaque lettre.

Différents instruments se prêtent à l'étude des ondulations de la parole et à la vérification des principes que nous venons de rappeler. Supposons, par exemple, qu'un diaphragme portant un style de platine soit disposé devant un cylindre animé d'un mouvement de rotation et recouvert de cire. A l'état normal, le style trace dans la cire un sillon de profondeur constante. Mais si l'on parle devant le diaphragme, l'air exhalé par les poumons fait vibrer

celui-ci et le style creuse un sillon inégal dont les variations de profondeur représentent les ondulations de la parole.

Si l'on fait repasser le cylindre sillonné sous le style, en forçant ce dernier à suivre toutes les inégalités du fond du sillon, le diaphragme, entraîné par le style, exécute de nouveau toutes les vibrations qu'il avait effectuées sous l'action de la voix. Ces vibrations sont transmises à l'air et les sons produits ne diffèrent des sons émis antérieurement devant l'instrument que par leur moindre intensité et un timbre spécial dû au diaphragme. C'est là le principe du *phonographe* Edison.

*Conclusion.* Des considérations qui précèdent nous pouvons tirer une conclusion importante au point de vue de la téléphonie, à savoir que, s'il suffit, pour la transmission de la musique et du chant, que l'appareil téléphonique recueille pour les propager les ondulations de grande amplitude correspondant aux sons fondamentaux, il est absolument nécessaire, pour la transmission de la parole, que cet appareil reproduise aussi les vibrations de très petite amplitude qui distinguent entr'elles les voyelles et les consonnes.

**664. — Téléphone électromagnétique de Bell.** — C'est à M. Graham Bell que revient l'honneur d'avoir, en 1876, construit le premier instrument permettant la transmission de la parole.

La fig. 418 montre la disposition du modèle primitif, encore très répandu, du téléphone Bell. Un aimant droit *m* est entouré à l'une de ses extrémités par une bobine de fil dont les bouts sont

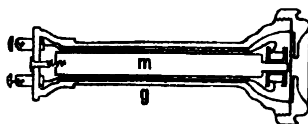



Fig. 418.

reliés à des bornes. Devant cette extrémité de l'aimant, et normalement à celui-ci, se trouve une plaque mince de fer encastrée sur son pourtour. Le tout est enfermé dans une gaîne en bois ou en ébonite *g*. Un pavillon vissé sur la gaîne maintient le diaphragme et fait fonction d'embouchure. Une vis de réglage permet de modifier l'écartement entre le noyau et le diaphragme.

Cet appareil peut servir à la fois de transmetteur et de récepteur. Deux instruments de ce genre, reliés par une ligne, permettent donc d'établir une correspondance téléphonique.

Lorsqu'on parle dans le pavillon de l'un des appareils, les ondes sonores engendrées viennent frapper le diaphragme ; celui-ci reproduit par résonnance exactement toutes les vibrations des sons fondamentaux et harmoniques émis. A chaque impulsion, le diaphragme s'approche de l'extrémité de l'aimant, puis s'en éloigne par son élasticité ; ces mouvements changent la distribution du champ magnétique de l'aimant et modifient le nombre des lignes de force qui traversent la bobine. Le rapprochement du diaphragme accroît le flux qui traverse celui-ci pour se rendre au pôle opposé et augmente par suite le nombre des lignes de force dans la bobine. Il résulte de là que chaque onde sonore fait naître dans la bobine une onde de courant induit de même durée et d'intensité correspondante.

Le courant ondulatoire ou périodique ainsi produit est reçu dans la bobine du second appareil. Là, chaque onde électrique fait varier l'intensité du champ magnétique du récepteur et, en conséquence, l'aimantation de toutes les pièces de fer situées dans le champ.

Analysons l'effet de ces variations. Ainsi que Page l'a observé, toute variation magnétique d'une pièce de fer est accompagnée de la production d'un son provenant des changements d'orientation des molécules magnétiques. Par suite de ces mouvements moléculaires, les pièces se déforment et l'air ambiant est mis en vibration. Chaque onde électrique engendre ainsi une onde sonore, les sons émis au poste transmetteur sont reproduits et peuvent être entendus par l'oreille appliquée contre le pavillon du récepteur.

Indépendamment de ces vibrations moléculaires, il se produit des vibrations transversales du diaphragme récepteur, occasionnées par les variations magnétiques du noyau, lesquelles déterminent des modifications correspondantes dans la force attractive de ce dernier.

Le rôle de ces mouvements d'ensemble du diaphragme est d'amplifier les ondes sonores recueillies; mais ce rôle peut devenir pernicieux si le son propre du diaphragme vient se superposer aux ondes de la parole. Si, par exemple, le diaphragme n'est fixé que

par un point, de manière à vibrer librement, il renforce les ondes sonores correspondant à sa période de vibration propre au détriment des autres, et le timbre de la parole est altéré.

**665. — Meilleures conditions de transmission et de réception.** — Les sons perçus avec le téléphone Bell au poste de réception sont beaucoup plus faibles que ceux émis au poste de transmission. Cet affaiblissement est dû, en premier lieu, à ce que le transmetteur n'est frappé que par une fraction des ondes sonores émises. En outre, il se produit des pertes dans la transformation de l'énergie mécanique des ondes sonores en énergie électrique, dans le transport de cette dernière sur la ligne et dans sa nouvelle transformation effectuée par le récepteur. Il y a là une transmission de puissance mécanique à faible rendement. Enfin, l'oreille ne perçoit qu'une fraction des ondes produites à l'arrivée.

L'idée la plus naturelle pour améliorer le rendement et renforcer la parole perçue est de donner au diaphragme du téléphone de grandes dimensions. Mais l'expérience montre qu'il y a pour ces dimensions des limites au delà desquelles l'accroissement d'intensité des sons est obtenu aux dépens de leur netteté, par suite de ce que les sons propres des diaphragmes s'ajoutent aux sons émis et aux sons reçus.

Le son fondamental propre du diaphragme doit dépasser en hauteur le son le plus élevé de la voix humaine ($ut_5$). Un diaphragme de 10 cm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur ou de 3 cm sur 0,1 mm satisfait à cette condition.

Il convient d'encastrer solidement le diaphragme, afin d'empêcher le grincement dû aux déplacements de la lame dans son support.

Enfin, il faut s'opposer à la déformation des sons par la résonnance de la masse d'air enfermée dans le téléphone et, dans ce but, adopter une chambre d'air aussi réduite que possible.

Pour augmenter l'amplitude des sons, on peut songer à accroître l'intensité du champ dans lequel se meut le diaphragme ; toutefois, il y a une limite qui dépend des dimensions de ce dernier. Il ne faut pas perdre de vue, en effet, que les ondes électriques transmises et les ondes sonores reçues sont en rapport avec la déformation des lignes de force. Or, les champs très intenses

opposent une grande résistance à cette déformation. On s'en est aperçu lorsqu'aux aimants on a voulu substituer des électro-aimants.

La force avec laquelle le noyau agit sur l'armature est proportionnelle au carré de l'intensité des pôles du noyau

$$f = k\ m^2;$$

la variation de cette force est $\Delta f = 2k\ m.\Delta\ m$.

On voit que la variation est nulle pour $m = o$, c'est à dire lorsque le noyau est à l'état neutre et pour $\Delta\ m = o$. Ces deux conditions montrent que le noyau doit être polarisé, mais non saturé, car, dans ce cas, les variations seraient nulles.

On a reconnu que les meilleurs résultats sont obtenus au moyen d'appareils dans lesquels le champ magnétique est concentré autant que possible dans la région occupée par le diaphragme et la bobine. Cette condition est atteinte au moyen d'aimants permanents recourbés, agissant par leurs deux pôles disposés vers le centre des diaphragmes, où les vibrations de ces derniers présentent l'amplitude maxima. C'est pourquoi, dans le téléphone Bell, on a substitué à l'aimant droit un aimant en fer à cheval, à branches allongées aux extrémités desquelles sont des noyaux ovoïdes en fer doux rapprochés du diaphragme et munis chacun d'une bobine de fil.

Dans les appareils usuels, les deux bobines sont enroulées à l'aide de fil de 0,8 mm de diamètre et ont une résistance de 130 ohms. L'aimant, formé de 4 lames superposées, mesure 11,5 cm de longueur. Le diaphragme a 6 cm de diamètre et 0,25 mm d'épaisseur. Un tel récepteur obéit à des courants periodiques dont l'intensité descend jusque 0,6 micro-ampère ; mais une conversation exige des courants d'au moins 12 micro-ampères.

**666. — Formes diverses du téléphone électromagnétique. Modèles Siemens, Ader, d'Arsonval ; téléphone montre, téléphone Mercadier.** — C'est à W. Siemens qu'on doit le premier téléphone industriel à aimant en fer à cheval. Cet appareil, fig. 419, présente des dimensions relativement fortes, ce qui favorise, comme nous l'avons vu, l'intensité de la transmission, mais en même temps les résonnances propres de l'instrument.

M. Ader emploie également un aimant permanent recourbé, qui sert de poignée au téléphone. Les lignes de force magnétique sont concentrées dans la région où se meut le diaphragme, par

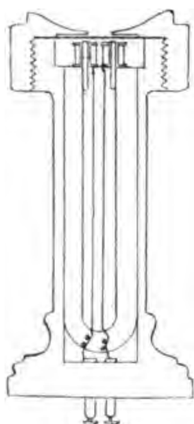


Fig. 419.

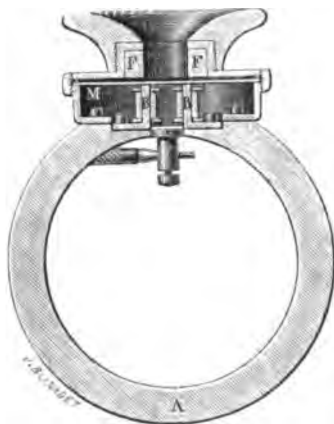


Fig. 420.

la présence d'un anneau en fer doux F disposé au dessus de la plaque de fer à une faible distance de celle-ci, fig. 420.

M. d'Arsonval utilise un champ magnétique annulaire au moyen d'un aimant recourbé dont l'un des pôles porte un noyau droit et le pôle voisin une bague concentrique en fer, fig. 421. La bobine est

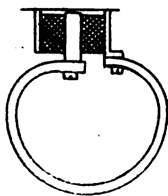


Fig. 421.

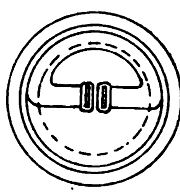


Fig. 422.

logée dans l'espace intermédiaire et le diaphragme couvre le tout. Cette combinaison est éminemment favorable à la concentration des lignes de force dans l'espace utile.

On fabrique de petits téléphones montres à bon marché, fig. 422, dans lesquels un aimant plat semi-circulaire présente des pôles recourbés normalement à un diaphragme parallèle au cercle de

l'aimant. Deux téléphones semblables reliés par une lame de ressort en arc de cercle peuvent se fixer contre les deux oreilles, de manière à éviter la fatigue qu'on éprouve à supporter les récepteurs pendant des essais de longue durée.

En étudiant la théorie du téléphone, M. Mercadier est arrivé à la conclusion qu'on peut réaliser une transmission excellente avec des appareils de très petites dimensions. Il a combiné deux téléphones minuscules reliés par une lame flexible et portant des cornets qui s'appliquent contre le pavillon de l'oreille et y sont maintenus par la lame. [1]

## TÉLÉPHONES A PILE OU MICROPHONES.

**667. — Microphone de Hughes.** — Les appareils électromagnétiques ne sont plus guère employés actuellement que comme récepteurs. Ils sont délaissés pour la transmission, par suite de l'insuffisance des courants induits qu'ils produisent. Lorsqu'on veut correspondre à des distances considérables, il faut abandonner le principe de la transformation directe de l'énergie mécanique des ondes sonores en énergie électrique et utiliser les vibrations de l'air pour modifier l'intensité du courant fourni par une pile. Le transmetteur joue alors le même rôle que la valve qui sert à faire varier un courant de vapeur et qui n'absorbe pour être manœuvrée qu'une force minime. MM. Edison et Hughes (1877, 1878) ont particulièrement fait des recherches dans cette voie : le premier, en interposant dans le circuit d'une pile du charbon en poudre dont la résistance est modifiée par la pression plus ou moins forte exercée sur lui par un diaphragme frappé par les ondes sonores; le second, en utilisant la variabilité de la résistance des contacts de conducteurs mobiles sous l'influence des vibrations de l'air.

Sous sa forme la plus connue, le microphone Hughes comprend une baguette de charbon $b$, amincie aux deux bouts et placée entre deux blocs $a$, $a'$ de la même substance fixés à une planchette verticale

---

(1) Consulter les travaux de M. Mercadier, *Électricien*, 1889 et 1891.

en bois mince. L'un des blocs de charbon est réuni au pôle d'une pile, l'autre à l'une des bornes d'un téléphone électromagnétique récepteur, et l'on complète le circuit en reliant la deuxième borne au pôle libre de la pile.

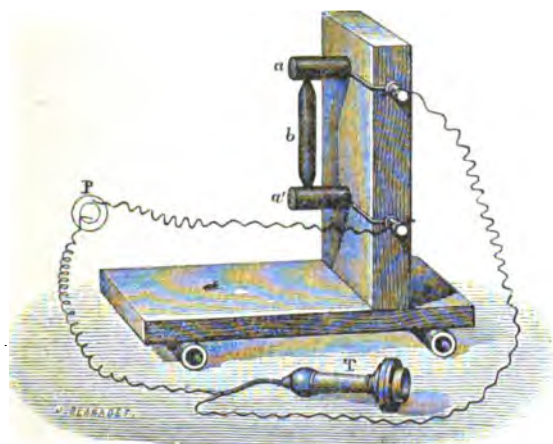



Fig. 423.

L'appareil permet de percevoir au téléphone des trépidations excessivement légères, par exemple, le tic-tac d'une montre placée sur le socle de l'instrument; de là le nom de microphone. Il faut remarquer que, dans cette expérience, ce n'est pas le bruit produit par la montre qui agit sur les charbons par l'intermédiaire d'ondes sonores, mais bien l'ébranlement mécanique communiqué par le support de l'appareil aux contacts mobiles dont la résistance est ainsi modifiée, ce qui fait naître dans le circuit des ondes électriques qu'accuse le récepteur.

Lorsqu'on parle devant l'appareil, les ondulations de l'air frappent la planchette et font vibrer les contacts de charbon en déterminant des modifications corrélatives de résistance. Il en résulte un courant ondulatoire dans le circuit, et le téléphone récepteur reproduit les paroles prononcées.

On remarquera qu'il est nécessaire, pour que ce résultat soit atteint, que le courant ne soit pas interrompu, mais simplement altéré. Reis avait imaginé dès 1860 un transmetteur à contact mobile, formé par un diaphragme sur le centre duquel appuie un

ressort très flexible. Lorsqu'on parle devant cet appareil, le diaphragme quitte le ressort à chaque onde fondamentale de la voix, en rompant le circuit. Un tel dispositif ne peut reproduire que la musique et non la parole, car les sons harmoniques émis pendant l'interruption du courant ne sont pas reproduits.

D'une manière générale, il faut et il suffit, pour que l'action microphonique se produise, qu'il y ait dans le circuit d'une pile un contact électrique permanent de résistance variable.

C'est ainsi que M. Hughes a pu transmettre la parole au moyen de deux clous chevauchant l'un sur l'autre et intercalés dans le circuit d'une pile et du récepteur : les vibrations de l'air faisaient varier la pression mutuelle des clous et modifiaient, par suite, l'intensité du courant produit par la pile.

**668. — Qualités d'un bon transmetteur téléphonique. Emploi de la bobine d'induction.** — Le carbone est la substance la plus convenable pour les contacts microphoniques. Son avantage sur les métaux et les composés métalliques semble être de ne pas donner, sous l'influence de l'étincelle électrique, d'oxyde solide susceptible d'augmenter considérablement la résistance du contact.

Un transmetteur microphonique doit présenter une sensibilité suffisante pour accuser les plus petites ondulations de l'air. Il convient toutefois que cette sensibilité ne résulte pas de la légèreté et de la mobilité excessives des pièces microphoniques, sans quoi ces pièces pourraient être projetées, sous l'action des grandes ondes sonores, de manière à rompre les contacts; il en résulterait des bruits intenses et désagréables à l'oreille.

Les microphones doivent d'autre part être peu sujets à se dérégler.

Ces deux qualités sont naturellement difficiles à concilier, et ce sont en général les appareils les plus sensibles qui se dérangent le plus aisément.

Pour renforcer la transmission, il semble naturel d'augmenter le nombre des contacts et d'accroître l'intensité du courant de la pile.

Le premier moyen est limité par le fait que les contacts écartés les uns des autres ne donnent pas toujours des effets concordants. Le timbre est d'autant plus net que les contacts sont plus rapprochés. L'énergie des ondes sonores ne permet d'ailleurs pas de mettre de grandes masses de charbon en mouvement et l'on conçoit que

l'amplitude des vibrations doit diminuer à mesure que la masse mobile croît.

La résistance d'un contact microphonique peut varier dans de larges proportions. Mais la résistance moyenne est voisine de 5 ohms.

En ce qui concerne le courant de la pile, on est limité par les étincelles déterminées aux contacts par une force électromotrice trop élevée. On admet que la plus grande différence de potentiel des pièces en contact ne doit pas excéder 1 volt.

Les piles employées avec les microphones sont du genre Leclanché ou Gassner. Le nombre d'éléments ne dépasse pas 2 ou 3. Un nombre élevé de couples occasionnerait des étincelles en cas de rupture accidentelle des contacts. C'est pourquoi les contacts microphoniques multiples sont associés en dérivation, afin de réduire la force électromotrice nécessaire.

Le microphone à pile permet de correspondre à une plus grande distance que le téléphone Bell. Il suffit amplement pour les communications à l'intérieur d'une maison ou d'une usine. On atteint cependant assez rapidement la limite d'éloignement des postes à partir de laquelle les sons cessent d'être perceptibles. La raison en est facile à comprendre. A mesure que la ligne s'allonge, sa résistance augmente, tandis que la variation de résistance que produit l'action des ondes sonores sur les contacts microphoniques reste constante. L'influence de cette variation sur la résistance totale du circuit va donc en diminuant et les ondulations du courant sont de plus en plus faibles. En appelant $e$ la force électromotrice de la pile, R la résistance du circuit, non compris celle des contacts microphoniques que nous désignerons par R′, on a

$$i = \frac{e}{R + R'}.$$

Une variation $\Delta R'$ des contacts donne une variation du courant égale à

$$\Delta i = -\frac{e \,.\, \Delta R'}{(R + R')^2}.$$

On voit que la variation du courant est inversement proportionnelle au carré de la résistance totale du circuit. Elle diminue donc très rapidement quand la longueur de la ligne croît.

D'un autre côté, le courant permanent qui traverse le récepteur attire le diaphragme et diminue la sensibilité de ce dernier.

M. Edison a porté remède à ces inconvénients grâce à l'emploi de la bobine d'induction, fig. 424. Dans le circuit primaire formé de gros fil, on intercale le microphone M et la pile P, tandis que les bouts de l'enroulement secondaire à fil fin sont reliés l'un à la ligne, l'autre à la terre, ou, s'il y a lieu, aux deux fils de la ligne. Par ce moyen, quelle que soit la longueur de celle-ci, les contacts microphoniques sont intercalés dans un circuit très peu résistant, et les variations de pression des contacts donnent lieu à des ondes électriques de grande amplitude dans le circuit primaire. Il se produit dans le circuit secondaire des forces électromotrices d'autant plus grandes que le nombre de spires induites est plus considérable. On peut développer ainsi des courants de tension suffisante pour franchir des lignes très résistantes.

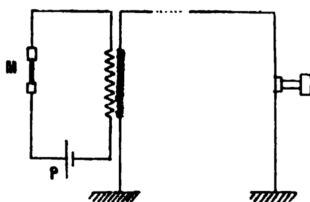



Fig. 424.

On remarquera qu'on ne peut employer que des bobines d'induction à circuit magnétique ouvert, car la force coercitive d'un circuit fermé gênerait les variations du flux magnétique, § 170.

Voici quelques détails sur des appareils destinés aux communications à grande distance.

Le noyau de la bobine est formé de fils de fer droits, de 0,55 mm de diamètre et 88 mm de longueur. Le diamètre du noyau mesure 15 mm. Le circuit primaire comprend 2 couches de fil isolé, de 1,2 mm de diamètre, ayant 0,12 ohm de résistance. Le fil secondaire, de 0,24 mm de diamètre, atteint une résistance de 125 à 250 ohms, suivant la longueur des circuits.

**669. — Transmetteurs à crayons de charbon. Microphones Ader et Dejongh.** — Dans un grand nombre de transmetteurs, on

emploie, comme dans le microphone Hughes, des crayons en charbon artificiel dur, placés entre des blocs de même substance fixés derrière une planchette mince en sapin devant laquelle on parle.

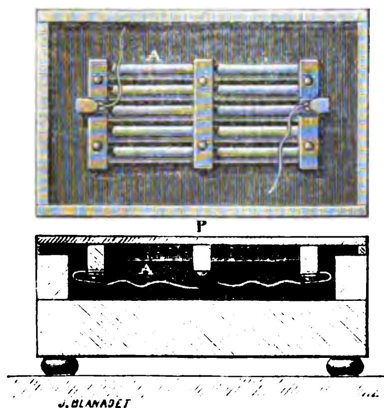



Fig. 425.

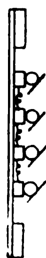


Fig. 426.

Les crayons se disposent de diverses manières. M. Ader les groupe parallèlement sur deux rangées, entre trois prismes de charbon attachés à une planchette inclinée, fig. 425. D'autres inventeurs disposent les crayons microphoniques radialement entre un bloc central et un anneau concentrique.

Dans le microphone Dejongh la planchette fixée debout reçoit des rangées verticales de pastilles de charbon sur lesquelles appuient librement des crayons de même substance soutenus par des tiges métalliques obliques, fig. 426.

L'avantage de ces transmetteurs est de n'exiger aucun réglage. A la longue, les charbons s'usent et la voix est altérée ; mais quelques légers chocs donnés à l'appareil suffisent pour renouveler les surfaces en contact. La multiplicité des contacts diminue parfois la netteté de l'articulation, parce que tous les contacts ne produisent pas des effets concordants.

670. — **Microphone Blake**. — L'appareil Blake ne comporte qu'un seul contact microphonique qui a lieu entre une goutte de platine *p* et un bloc de charbon extrêmement dur *c*, portés tous

deux par l'équerre L, au moyen de ressorts *a*, *b*. On agit sur le contact en parlant devant un diaphragme métallique I, encastré sur son pourtour dans un anneau de caoutchouc qui sert à amortir l'action sur le diaphragme des vibrations mécaniques extérieures.

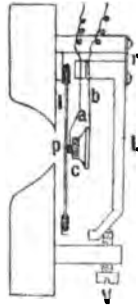



Fig. 427.

L'appareil se règle au moyen de la vis V qui, en déplaçant l'équerre L suspendue au ressort *r*, modifie la pression des pièces en contact. On peut arriver à rendre la sensibilité telle qu'il est possible de correspondre en s'éloignant à plusieurs mètres du transmetteur. Mais le contact est alors très précaire et il s'ensuit des ruptures de circuit qui provoquent des bruits désagréables (crachements) dans le récepteur. On règle généralement l'appareil de manière que la bouche doit être approchée à 20 cm de la plaque.

Les transmetteurs précédents sont moins sensibles et exigent, en général, qu'on parle contre le diaphragme.

671. — **Microphones Edison et Hunnings.** — On a vu que M. Edison a utilisé les variations de résistance de la poudre de charbon avec la pression pour modifier le courant microphonique. La fig. 428 montre les détails de l'appareil. Les ondes sonores viennent frapper un diaphragme métallique L encastré sur son pourtour. Contre le centre appuie un piston qui agit sur une pastille de noir de fumée, placée entre deux disques de métal. Une vis, appuyant contre le disque postérieur, permet de régler à volonté la pression exercée par le diaphragme sur la pastille.

Dans cet appareil, les contacts microphoniques sont particulaires. Dans le microphone Hunnings, qui présente quelque ana-

logie avec le précédent, l'inventeur a substitué au noir de fumée des granules, beaucoup plus mobiles, de charbon adamantin, dont la masse peut varier de résistance entre des limites bien plus étendues.

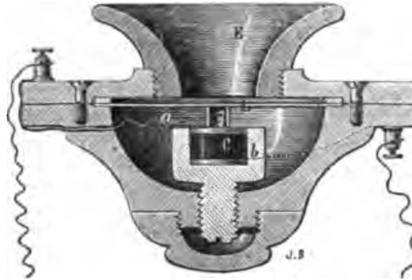


Fig. 428.

Le courant entre par un bloc de charbon *c*, fig. 429, et traverse les granules maintenues par un chapeau fixé au diaphragme D, par

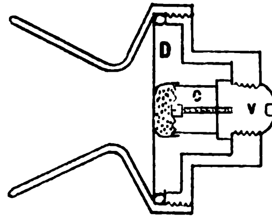



Fig. 429.

lequel sort le courant. On peut régler le serrage de la masse pulvérulente à l'aide d'une vis *v*.

Une forte secousse suffit pour déplacer les granules et rafraîchir les contacts de celles-ci.

## APPAREILS DIVERS.

**672. — Condensateur récepteur.** — On a imaginé des récepteurs téléphoniques basés sur des principes très différents de ceux du téléphone Bell. Nous passerons rapidement en revue quelques uns de ces appareils qui, bien qu'ils ne se soient pas répandus, offrent un intérêt théorique.

En 1876, Varley observa qu'un condensateur rend un son quand les armatures sont soumises à des potentiels variables. Le fait s'explique par des charges et des décharges successives produisant des attractions entre les armatures, suivies de retours à la position d'équilibre. Ces vibrations se communiquent à l'air ambiant.

Cette découverte a été appliquée à la téléphonie par MM. Dolbear et Herz.

La fig. 430 montre la disposition des appareils adoptée par M. Herz. Le condensateur récepteur C, dont les armatures sont peu serrées afin d'être libres de vibrer, est chargé d'une manière permanente par la pile du poste de transmission. L'action du

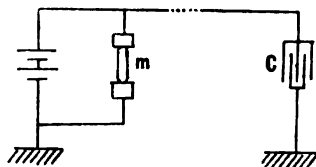



Fig. 430.

microphone transmetteur *m* intercalé en dérivation par rapport à la pile fait varier le potentiel à l'extrémité de la ligne et, par suite, la charge des armatures et leur attraction mutuelle. Ces armatures, par leurs mouvements, reproduisent les ondes sonores.

La réception est moins nette que celle obtenue par le téléphone Bell, à cause des résonnances du condensateur.

Le condensateur doit être normalement chargé, comme l'indique le schéma, de même qu'un récepteur électromagnétique doit être aimanté au préalable: les variations de la force attractive qui s'exerce entre les armatures sont proportionnelles à la charge initiale.

673. — **Thermophone de M. Preece.** — Ce récepteur se compose d'une membrane métallique encastrée sur son pourtour et tendue normalement par un fil de platine fixé au centre du diaphragme. L'appareil est fixé sur une table d'harmonie. Toutes les modifications d'intensité du courant téléphonique qui traverse le fil de platine se traduisent par des variations de température et, par suite, de longueur du fil. Le diaphragme, obéissant à toutes ces fluctuations, communique à l'air des ondulations de même période

que celles du courant, et les sons transmis sont répétés, mais avec une amplitude extrêmement réduite qui rend impossible l'emploi pratique du récepteur.

674. — **Récepteur chimique de M. Edison.** — Une lame de ressort, communiquant avec la ligne L, est attachée à un disque de mica M et appuie, par son extrémité libre munie d'un frotteur de platine, sur un cylindre C relié à la terre. Ce cylindre est formé de papier imbibé d'hydrates de chaux et de potasse. Grâce à un moteur spécial, il tourne d'un mouvement régulier autour de son axe et, à cause de la friction qui s'exerce sur le frotteur, produit par l'intermédiaire du ressort une certaine traction sur le disque de mica.

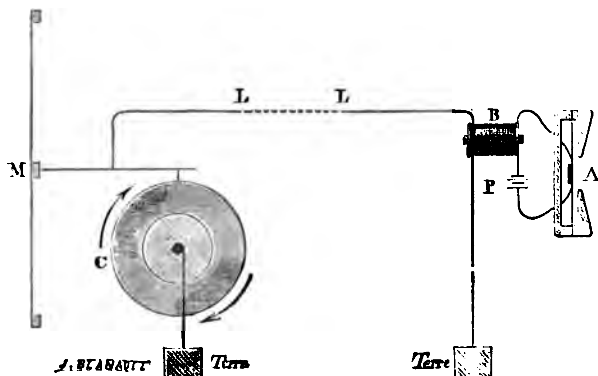



Fig. 431.

Dans les conditions normales, cette tension ne varie pas; mais, lorsqu'une onde électrique est envoyée sur la ligne, le courant, en passant du frotteur au cylindre, altère chimiquement la surface de contact, de manière à modifier le frottement; par suite, il y a variation de la traction exercée sur le diaphragme et celui-ci fléchit. La flexion est proportionnelle à la variation du coefficient de frottement, laquelle est elle-même en rapport avec la valeur du courant.

Ce récepteur est susceptible de reproduire avec une grande intensité, de manière à le faire entendre d'une salle entière, le chant émis devant un transmetteur microphonique. Mais il est incapable de donner les articulations de la parole.

**675. — Radiophone.** — M. Bell a utilisé la variation de résistance électrique du sélénium cristallin sous l'influence de la lumière pour obtenir un récepteur sensible à un faisceau lumineux dont l'intensité est modifiée par la voix.

Imaginons un faisceau cylindrique de lumière envoyé sur un diaphragme argenté et réfléchi par un miroir parabolique qui concentre les rayons sur une pile de plaques de sélénium disposées en dérivation dans un circuit renfermant un générateur hydro-électrique et un téléphone électromagnétique.

En parlant derrière le diaphragme, on fait varier l'intensité du faisceau réfléchi et par suite la résistance des plaques de sélénium. Le courant ondulatoire qui en résulte actionne le téléphone. M. Bell a pu écarter le diaphragme transmetteur à deux kilomètres du sélénium récepteur.

## APPELS ET POSTES TÉLÉPHONIQUES.

**676. — Appels.** — Dans toute communication téléphonique établie entre deux postes, il est nécessaire qu'un dispositif spécial permette au poste qui désire transmettre de prévenir son correspondant; ce dispositif porte le nom d'*appel*.

Avec certains téléphones électromagnétiques de grand modèle, on a tenté de faire l'appel au moyen des appareils mêmes qui servent à la transmission et à la réception. Ainsi, sur le téléphone transmetteur de Siemens, § 666, peut se placer un cornet à anche. En soufflant dans celui-ci, on engendre de fortes vibrations qui, reproduites dans le récepteur, donnent un son assez intense pour être entendu dans une chambre. Toutefois, un appel de cette nature est beaucoup moins distinct que celui des sonneries. Aussi, celles-ci sont-elles préférées. Elles peuvent être actionnées par une pile ou, ce qui est préférable au point de vue de l'entretien, par un petit générateur magnéto-électrique, une bobine induite de Siemens, par exemple, § 315, à laquelle on communique au moyen d'une manivelle un mouvement de rotation dans un champ magnétique permanent.

Si le générateur est une pile, on emploie la sonnerie trembleuse, § 644.

Dans le cas d'une magnéto produisant des courants alternatifs, on utilise une sonnerie polarisée dont le diagramme est représenté par la fig. 432. Deux noyaux d'électro-aimant M et *m*, ainsi qu'une armature *a*, sont polarisés par un aimant recourbé NS. Les courants alternatifs qui traversent les bobines renforcent et réduisent alternativement le magnétisme des noyaux et sollicitent l'armature,

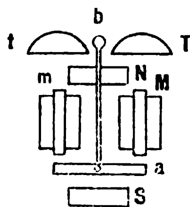



Fig. 432.

mobile autour d'un axe passant par son milieu, à se rapprocher successivement des deux noyaux en entraînant un battant *b* contre des timbres T, *t*. La séparation des noyaux des bobines réduit la self-induction de celles-ci à une valeur assez faible pour qu'elles n'opposent pas une impédance trop grande aux courants alternatifs.

677. — **Annonciateur.** — On désigne sous ce nom un signal visible mû par un électro-aimant E qui, sous l'influence du courant

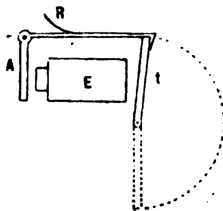



Fig. 433.

d'appel, attire une armature A repoussée par un ressort antagoniste R. Le mouvement de l'armature dégage une plaque inclinée *t* qui bascule autour d'un axe en découvrant un numéro indicateur.

678. — **Poste téléphonique.** — La figure schématique 434 donne un exemple de la disposition des différents appareils que comporte un poste téléphonique. A l'entrée des fils de ligne (nous suppo-

serons un circuit complètement métallique, sans retour par la terre) se trouve un parafoudre à pointes P. Lorsque les fils du téléphone sont voisins de conducteurs servant à l'éclairage ou à la traction électrique, il est bon de munir le poste de fils fusibles, afin qu'un contact accidentel ne puisse provoquer un courant dangereux pour les appareils téléphoniques. A l'état normal, le téléphone récepteur T est suspendu à un levier basculant qu'un ressort tend à relever. Le poids du téléphone amène la tige contre un buttoir inférieur; par ce moyen, la ligne communique par le commutateur *d* avec la

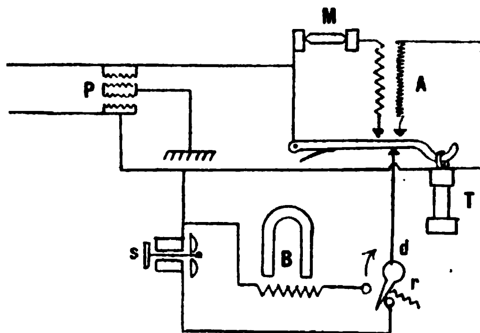



Fig. 434.

sonnerie *s*. Ainsi l'on peut recevoir le courant d'appel. Pour appeler, on tourne la manivelle de la magnéto, dont l'axe traverse *d* à frottement dur. On relie ainsi la ligne avec la bobine de Siemens B et l'on transmet des courants. Cette manœuvre terminée, le commutateur *d* revient sur son buttoir de repos grâce au ressort *r*. Lorsqu'on décroche alors le récepteur T, le levier réunit les buttoirs supérieurs et ferme simultanément le circuit primaire comprenant la pile et le circuit secondaire de la bobine d'induction A. On peut alors transmettre par le microphone M ou recevoir par le téléphone T.

Sur les longues lignes, on utilise deux téléphones récepteurs placés en dérivation l'un par rapport à l'autre et qu'on applique contre les deux oreilles.

## LIGNES TÉLÉPHONIQUES.

679. — **Considérations théoriques.** — Les courants téléphoniques étant ondulatoires peuvent être représentés approximativement par

une fonction sinusoïdale du temps. On est donc fondé à leur appliquer les résultats trouvés pour les courants périodiques.

Si l'on se reporte à ces résultats, on voit que la self-induction du circuit tend à provoquer une diminution et un retard de phase de l'intensité du courant d'autant plus grands que la fréquence de celui-ci est plus considérable. Il s'ensuit que les sons aigus sont relativement plus affaiblis que les sons graves. En outre, ils tendent à retarder davantage, ce qui, dans le mélange de sons fondamentaux et de sons harmoniques que présente la parole, amène une déformation du timbre.

Il conviendra donc de diminuer autant que possible la self-induction des circuits, en évitant tout électro-aimant inutile et en employant sur les lignes des conducteurs non magnétiques.

La limite de la portée de la voix a été trouvée de 500 km avec des lignes en fil de fer, tandis qu'on a pu correspondre à 3 000 km par des fils de bronze.

M. Massin a trouvé $\mathcal{L} = 0{,}0129$ quadrant par km pour 2 fils de fer, de 3 mm de diamètre, distants de 40 cm et $\mathcal{L} = 0{,}0025$ pour des fils de bronze de 2,5 mm et de même écartement, soit le 1/5e de la self-induction du fer.

Les lettres contenant des harmoniques très aiguës, les sifflantes *s*, *c*, *z* par exemple, sont naturellement les plus déformées et sont difficiles à distinguer sur les lignes étendues.

On a songé à corriger les effets de la self-induction par un condensateur intercalé en série dans la ligne. On a vu, en effet, § 199, qu'une capacité joue le rôle d'un coefficient de self-induction négatif et tend à provoquer une avance de phase du courant. Lorsque la condition $a^2 c \mathcal{L} = 1$ est remplie, la neutralisation des effets est parfaite; mais il est à noter que cela ne subsiste que pour des sons d'une certaine hauteur.

On remarquera que la capacité des bobines dont les spires exercent des effets condensants les unes sur les autres est en série avec la ligne.

La capacité des lignes agissant comme un condensateur en dérivation exercera un effet absorbant très préjudiciable. Sur les lignes aériennes, dont la capacité est faible (0,01 microfarad par km environ), cet effet ne se fait sentir que sur les réseaux étendus,

mais, avec les câbles souterrains et sous-marins, on arrive rapidement à la limite de la portée de la voix. Ce fait résulte de ce que les ondes électriques sont absorbées par le câble et se fondent les unes dans les autres. Nous avons vu, à propos de la transmission des signaux télégraphiques, que les ondulations de l'intensité du courant à l'arrivée sont d'autant moins prononcées que les signaux sont transmis plus rapidement. Or, les courants téléphoniques se succèdent à des intervalles de temps extrêmement courts. L'effet est surtout marqué pour les sons élevés et les harmoniques qui comportent un grand nombre de vibrations.

L'examen de la question par le calcul présente une grande complexité et, en l'absence de résultats théoriques précis, on est obligé jusqu'à présent de recourir à des indications empiriques pour la détermination des meilleures conditions à remplir.

On a vu précédemment que la vitesse limite de propagation des signaux dépend du produit de la capacité par la résistance du câble.

M. Preece a fait des expériences pour déterminer l'influence du produit CR (microfarads-ohms) sur les communications téléphoniques. Il a reconnu que, pour $CR \leqq 10\,000$, la conversation est satisfaisante sur les circuits en fil de cuivre et, pour les circuits en fil de fer, lorsque $CR \leqq 5\,000$.

Indépendamment de la self-induction et de la capacité des circuits, divers éléments apportent des troubles ou causent des affaiblissements dans la transmission.

Les *joints défectueux* des lignes aériennes vibrant sous l'action du vent font l'effet de contacts microphoniques pour les courants telluriques qui traversent les conducteurs et occasionnent dans les récepteurs un bruit de *friture* caractéristique.

Ce bruit est augmenté par des causes assez nombreuses : les oscillations des fils ballotés par le vent dans le champ magnétique terrestre, d'où naissent des courants d'induction, particulièrement accentués avec les fils de fer qui concentrent les lignes de force ; les courants produits par les décharges atmosphériques ou par les orages magnétiques ; enfin, les actions chimiques s'exerçant au contact des plaques de terre et du sol.

Les *courants dérivés* provenant des lignes télégraphiques ou autres situées dans le voisinage occasionnent également des perturbations. Si, par exemple, le retour se fait par le sol et si une prise de terre télégraphique est voisine de la prise de terre téléphonique, un courant dérivé passera sur la ligne téléphonique et, par suite de la sensibilité des récepteurs, sera accusé par ceux-ci.

Des communications peuvent s'établir, surtout en temps humides, entre les différents fils d'une même ligne, à travers les isolateurs. Les courants dérivés qui en résultent acquièrent, sur les lignes longues ou imparfaitement isolées, une intensité suffisante pour agir sur les téléphones. On évite cet inconvénient en employant des isolateurs à double cloche et en reliant entr'eux et à la terre, par un fil de fer qui contourne le poteau, les supports métalliques des isolateurs. De la sorte, le courant électrique qui franchit un isolateur se rend directement dans le sol et non sur les fils voisins. Le conducteur en fer, qu'on a soin de prolonger au dessus du poteau, sert en même temps de paratonnerre pour celui-ci.

Enfin, une dernière cause de trouble, et non la moins grave, est l'*induction* d'un fil sur l'autre. Lorsque sur un conducteur parallèle à un fil téléphonique l'on envoie un courant, il se produit deux effets distincts sur la ligne téléphonique :

1° Un courant de charge statique parcourt la ligne en entrant dans cette dernière par les deux extrémités.

2° Un courant d'induction mutuelle de sens opposé à celui du courant inducteur traverse la ligne téléphonique. Par suite de la sensibilité des récepteurs, ces courants induits permettent d'entendre sur une ligne ce qui se dit sur une autre ligne, même lorsque celle-ci est parallèle à la première sur une distance assez courte. Si la distance est considérable, on peut entendre la parole transmise aussi bien que sur la ligne directe.

Pour remédier à l'induction mutuelle, un premier moyen a été proposé par M. Hughes. Il consiste à terminer les différents fils aboutissant à un poste par des bobines plates, disposées de telle sorte qu'en agissant par influence les unes sur les autres elles tendent à donner naissance à des courants induits de sens contraires à ceux qui se produisent sur les lignes.

Ce procédé anti-inducteur peut être efficace dans le cas de deux fils. En réglant convenablement l'écartement des bobines placées aux extrémités, on annule l'induction réciproque des deux lignes. Mais lorsque le nombre de fils augmente, le moyen réussit moins bien, car il devient de plus en plus difficile de disposer les bobines de façon à ce que l'une quelconque d'entr'elles se trouve dans une position convenable relativement à toutes les autres.

La solution la plus satisfaisante consiste à ne pas employer la terre pour le retour des courants téléphoniques, mais à faire usage de circuits entièrement métalliques. On évite de la sorte les dérivations provenant des prises de terre voisines et les courants de charge électrostatique, ainsi que les bruits de friture occasionnés par les courants telluriques et autres.

Les deux fils constituant une ligne téléphonique doivent être placés dans les mêmes conditions relativement aux lignes voisines, de telle sorte que les forces électromotrices d'induction qui y naissent se détruisent dans le circuit. Dans les câbles formés de fils isolés, les deux conducteurs composant un circuit sont tordus l'un sur l'autre. Dans les lignes aériennes, constituées par des fils nus, le procédé est plus difficile à appliquer. Les fils sont changés de place sur les poteaux de manière à être également influencés par les fils voisins.

Malgré la dépense supplémentaire, les avantages du circuit métallique sont tels, que ce dernier a été vivement recommandé par le Congrès des Électriciens de 1889.

**680. — Lignes aériennes.** — Les lignes téléphoniques urbaines se composent de fils, de 1,25 à 1,4 mm de diamètre, en bronze ayant 30 à 40 pour 100 de la conductibilité du cuivre pur. Ces fils sont posés, avec les soins indiqués au § 523, sur des isolateurs à double cloche supportés en général par des chevalets métalliques appuyés sur les toits des maisons.

Dans les lignes interurbaines de grande longueur, les fils de bronze ont de 2,5 à 3 mm de diamètre. Sur ces lignes, les fils téléphoniques sont généralement voisins d'autres fils et il est indispensable, pour les raisons signalées au paragraphe précédent, d'adopter

des circuits métalliques complets, formés de deux conducteurs semblablement disposés par rapport aux fils voisins pour annuler l'induction mutuelle.

Dans le dispositif de la fig. 435, on voit un croisement de deux

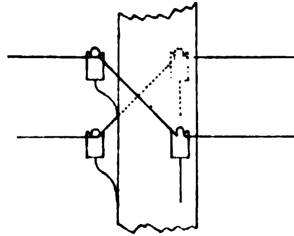


Fig. 435.

fils au moyen de quatre isolateurs. Le brin supérieur et postérieur devient inférieur et antérieur. En répétant ces croisements, on obtient le même résultat que par les fils isolés tordus. On se borne au nombre de croisements strictement nécessaire. Dans un faisceau de fils invariable, il suffit d'un seul croisement des deux fils téléphoniques au milieu du parcours. Si le nombre des conducteurs influençants varie, il faut multiplier les croisements de manière que chaque fil inducteur agisse également sur les deux fils téléphoniques.

Dans les faisceaux urbains comprenant un grand nombre de fils téléphoniques aériens, on ne croise pas d'ordinaire les deux fils d'un circuit, parce que la réaction mutuelle des courants induits fait équilibre à l'action du courant inducteur.

**681. — Câbles téléphoniques.** — Afin de supprimer les énormes faisceaux de fils aériens dans les grandes villes, on a réuni les conducteurs sous forme de câbles comprenant 25 à 100 circuits. Ces câbles, composés de conducteurs en cuivre de 0,7 à 0,9 mm de diamètre, peuvent être aériens ou souterrains. Les premiers sont soutenus de distance en distance par un fil métallique résistant. Dans les villes qui ne disposent pas d'un réseau d'égouts à grande section, les câbles souterrains sont habituellement tirés dans des conduites métalliques.

L'isolant employé dans les câbles est généralement le coton ou le jute imprégné de paraffine ou d'un composé équivalent de faible capacité spécifique. L'imperméabilité est assurée par un tuyau de plomb.

Pour combattre l'induction mutuelle et le courant de charge dans le cas de circuits à retour par la terre, M. Paterson dispose un gros fil de cuivre de 3 mm de diamètre dans l'axe du faisceau de conducteurs. Les courants induits et les courants de charge provoqués dans ce conducteur central par un fil téléphonique équilibrent en partie l'effet de ce dernier sur les fils voisins.

MM. Felten et Guilleaume, ainsi que MM. Siemens et Halske, combattent les effets signalés en enroulant autour de chaque fil isolé une mince feuille métallique qui exerce une influence analogue à celle du fil précédent. La chemise extérieure de plomb concourt au même résultat.

Mais ces moyens augmentent la capacité des conducteurs, laquelle constitue le grand ennemi des câbles, § 679. Cette capacité atteint dans les câbles Felten 2,4 microfarads par kilomètre.

La solution la plus favorable consiste à employer des circuits métalliques formés de deux fils tordus, les couples de fils étant ensuite câblés. On évite ainsi complètement l'induction mutuelle et la capacité est réduite. En vue de diminuer cette dernière, on cherche depuis quelques années à utiliser pour les câbles téléphoniques des enveloppes isolantes poreuses contenant autant d'air que possible, l'air ayant une capacité spécifique très inférieure à celles des diélectriques solides, § 93.

Dans cet ordre d'idées, la *Metropolitan Telephone C°*, de New-York, emploie des conducteurs revêtus de pâte de papier séchée et consolidée par une couverture de coton. Cet isolant étant peu coûteux peut s'appliquer sous une forte épaisseur. Les doubles fils sont câblés entr'eux et le faisceau est protégé par une enveloppe de plomb. Les extrémités du câble sont soigneusement paraffinées pour éviter les rentrées d'humidité. Un tel conducteur double n'a guère qu'une capacité de 0,07 microfarad par km. L'isolement atteint 160 mégohms par km, ce qui est très suffisant.

Le câble Fortin-Hermann, § 542, a été imaginé en vue de la téléphonie; il présente également une capacité faible.

On a effectué des transmissions téléphoniques par les câbles sous-

marins, où l'isolant employé est la gutta-percha. C'est ainsi qu'une ligne téléphonique posée entre Buenos-Ayres et Montevideo comporte 45 km de câble, à la traversée du Rio de la Plata.

Les lignes téléphoniques de Paris à Londres comprennent la section sous-marine Calais-Douvres (37,5 km). Dans cette partie, elles sont formées de quatre conducteurs tordus deux à deux de manière à constituer deux circuits téléphoniques. On a calculé les lignes de telle sorte que le produit CR ne dépasse pas 7500. La capacité et la résistance des sections aériennes étant connues, le problème était ramené à déterminer le diamètre minimum de l'âme du câble.

Soient $c$ la capacité des lignes aériennes, $r$ leur résistance, C la capacité du conducteur sous-marin, R sa résistance, X le diamètre du diélectrique, $x$ celui du conducteur enveloppé.

On a les relations

$$7500 = (c + C)(r + R) \qquad (1)$$

$$R = \frac{a}{x^2} \quad (2) \qquad C = \frac{b}{\log_e \frac{X}{x}} \quad (3).$$

Une 4e relation entre C, R, X et $x$ est donnée par la condition $\frac{dX}{dx} = 0$ correspondant au minimum de X.

Le calcul définitif a conduit à

$$X = 9,6 \text{ mm}$$
$$x = 2,35 \text{ mm}.$$

Les âmes isolées à la gutta-percha sont abritées par un matelas de jute tanné et revêtues d'une armature en fils de fer de 7 mm de diamètre.

## TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE SIMULTANÉES.

**682. — Procédé Van Rysselberghe.** — M. Van Rysselberghe a trouvé un moyen ingénieux d'affecter les lignes télégraphiques existantes à la correspondance téléphonique ou inversement les lignes téléphoniques au trafic télégraphique.

Sur une ligne télégraphique aérienne un courant de signal s'établit presque instantanément. Un tel courant agissant, soit directement, soit par induction, sur un téléphone déplace vivement le diaphragme récepteur et produit un bruit sec qui se répète au moment où le courant est interrompu. M. Van Rysselberghe a empêché la production du son, en augmentant considérablement la durée des

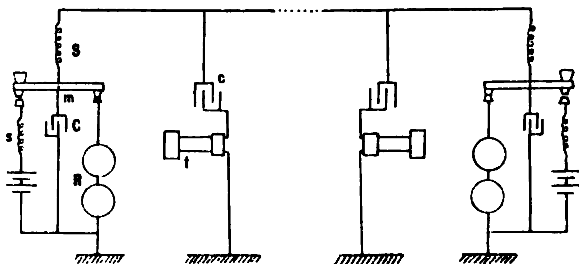



Fig. 436.

périodes d'établissement et de cessation des courants télégraphiques. Pour y arriver, il reliait, dans ses premiers essais, la ligne télégraphique à l'une des armatures d'un condensateur C dont l'autre armature était à la terre, fig. 436. Sur le conseil de l'auteur, il adjoignit à ce condensateur des électro-aimants qu'il appela *graduateurs* et disposa en S et *s*.

Voici l'effet de ces appareils. Lorsqu'on abaisse le manipulateur du poste télégraphique, le courant rencontre la résistance apparente des deux graduateurs qui s'aimantent aux dépens de l'énergie fournie par la pile. En outre, une partie de cette énergie est absorbée par le diélectrique du condensateur. Ces diverses causes ne permettent au courant que de s'établir lentement, de sorte qu'un téléphone intercalé dans la ligne a son diaphragme graduellement attiré et n'émet qu'une onde grave imperceptible.

Lorsqu'on relève la clef, le courant ne cesse pas brusquement; la décharge du condensateur et l'extra-courant du graduateur S prolongent le courant, de manière à annuler à peu près complètement son action téléphonique.

Pour arriver à de bons résultats, on donne au condensateur C une capacité de 2 microfarads. Les électro-aimants graduateurs sont formés d'un noyau revêtu d'une bobine de 500 ohms entourée

d'un tube en fer; le circuit magnétique est fermé par deux plaques du même métal. La self-induction est de 6 quadrants.

Les courants téléphoniques ne gênent pas le télégraphe; on ne peut cependant pas intercaler les téléphones dans une ligne télégraphique, car celle-ci présente, par le fait des électro-aimants qu'elle renferme, un grand coefficient de self-induction qui serait une cause d'affaiblissement considérable de la parole transmise. On ne peut davantage les placer directement en dérivation sur les postes télégraphiques, car la plus grande partie du courant émis par le manipulateur d'une station se rendrait à la terre par le téléphone voisin. M. Van Rysselberghe tourne la difficulté en coupant la communication de chaque poste téléphonique avec la ligne par un condensateur $c$, dit *séparateur*, qui n'empêche pas la transmission des courants alternatifs.

Supposons qu'on parle au téléphone $t$. Le courant ondulatoire émis trouve deux chemins : d'une part la ligne, d'autre part les installations télégraphiques voisines dont le coefficient de self-induction lui oppose une résistance apparente énorme. Aussi presque tout le courant suit la ligne; l'expérience prouve que la dérivation à travers les appareils télégraphiques ne nuit pas d'une façon sensible à la communication téléphonique. Pour une raison semblable, les courants variables qui arrivent à l'extrémité de la ligne traversent pour la plus grande partie le condensateur et le poste téléphonique.

**683. — Cas de plusieurs lignes téléphoniques.** — Les connexions de la fig. 436 permettent de correspondre simultanément par télégraphe et par téléphone sur un même fil, si même ce dernier est voisin d'autres fils télégraphiques, à condition, bien entendu, que tous les fils soient pourvus d'appareils graduateurs; sinon l'influence de l'induction mutuelle entre la ligne à double service et les courants télégraphiques non gradués empêcherait la conversation. On ne pourrait, par ce dispositif, utiliser pour la téléphonie deux fils télégraphiques voisins, car il y aurait induction téléphonique entre les fils et l'on entendrait sur une ligne tout ce qui se dirait sur l'autre. Pour éviter cette induction, il est absolument nécessaire de faire usage du double fil, c'est à dire

d'employer deux fils télégraphiques pour former un circuit téléphonique; encore faut-il que les accouplements soient faits d'une manière judicieuse et que les fils d'un même circuit soient croisés en des points convenables.

C'est ainsi qu'en Belgique l'on a utilisé les fils télégraphiques directs, § 641, pour la téléphonie interurbaine entre les bureaux principaux, en échelonnant des croisements analogues à celui de la fig. 435. Au besoin les fils omnibus sont utilisés également, en

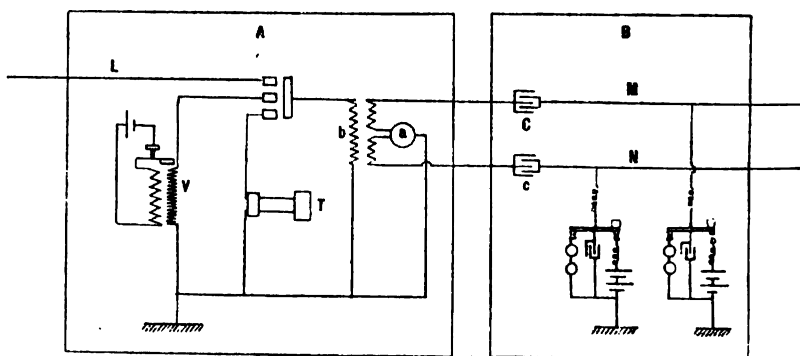



Fig. 437.

intercalant entre les tronçons aboutissant aux postes intermédiaires des condensateurs de 0,5 microfarad, appelés *connecteurs*. Ces tronçons sont croisés dans les bureaux où ils pénètrent, afin d'éviter les croisements spéciaux sur les poteaux.

Si l'on doit faire communiquer deux abonnés de réseaux urbains différents, deux cas peuvent se présenter.

1° Les abonnés sont raccordés aux bureaux centraux téléphoniques par un double fil. Dans ce cas, on connecte ces fils avec des conducteurs auxiliaires reliant les bureaux téléphoniques aux bureaux télégraphiques et l'on complète le circuit à l'aide de deux fils télégraphiques par l'interposition de condensateurs séparateurs, comme il a été décrit ci-dessus. Ce dispositif fournit d'excellentes communications, surtout si les lignes télégraphiques sont aériennes et en fil de bronze.

2° Dans beaucoup de réseaux urbains, les abonnés sont reliés aux bureaux téléphoniques centraux par un seul fil. Le problème devient alors plus compliqué.

La fig. 437 montre le principe de la solution suggérée par M. Bennet, dans laquelle on utilise la bobine d'induction pour passer de la ligne simple à la ligne double.

M et N sont des fils télégraphiques ; C et *c* des condensateurs séparateurs installés au poste télégraphique B ; une bobine d'induction *b*, appelée *translateur phonique*, est placée dans le bureau téléphonique central A. Le fil primaire de cette bobine peut être relié au poste téléphonique transmetteur par la ligne L ; le fil secondaire est connecté aux condensateurs séparateurs par l'intermédiaire des conducteurs auxiliaires qui unissent le bureau central téléphonique au bureau télégraphique. Les bobines secondaires comprennent un appareil *a*, appelé *relais phonique*, dont un point communique avec la terre. Grâce à cette liaison avec le sol, les courants télégraphiques émis sur l'un des fils ne peuvent pas influencer, par induction électrostatique, les séparateurs de l'autre fil et ainsi provoquer de faux signaux sur celui-ci.

Lorsque plusieurs translateurs sont voisins les uns des autres, on les aligne en plaçant les noyaux alternativement debout et couchés, afin qu'ils ne s'influencent pas les uns les autres.

Les courants téléphoniques ondulatoires produits sur la ligne L provoquent des courants induits dans l'enroulement secondaire de *b*. Ces courants induits parcourent le circuit à double fil et, par l'intermédiaire du translateur de la ville raccordée, agissent sur le téléphone du poste récepteur correspondant.

Les translateurs sont constitués par des bobines enroulées sur des noyaux en fer, en forme de tubes fendus de 7,8 cm de longueur, 1 cm de diamètre et 1,5 mm d'épaisseur. La bobine primaire présente 20 couches de fil de 0,23 mm et de 80 ohms de résistance. L'enroulement secondaire possède également 20 couches de fil de 0,16 mm ayant 300 ohms.

L'introduction des deux translateurs dans les communications téléphoniques amène un affaiblissement considérable de la parole. On estime à 75 pour 100 la réduction de ce chef de la portée de la voix ; aussi, l'emploi du double fil dans les réseaux téléphoniques urbains constitue-t-il à ce point de vue une amélioration notable.

**684. — Relais phonique.** — Les appareils avertisseurs entre les bureaux téléphoniques des villes correspondantes ne peuvent être des sonneries ordinaires qui exigent des courants assez intenses pour influencer, à travers les condensateurs séparateurs, les communications télégraphiques. Voici le principe du système d'appel adopté. Le bureau appelant A envoie sur la ligne, au moyen d'une bobine de Ruhmkorff V, appelée vibrateur, dont le primaire a 0,2 ohm et le secondaire 1000 ohms, des courants alternatifs à courte période qui n'agissent pas sur les appareils télégraphiques. Ces courants passent dans l'appel phonique *a* du poste correspondant.

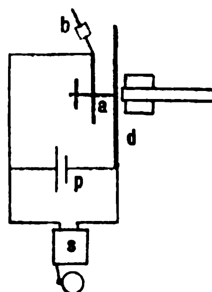



Fig. 438.

L'appel comprend un grand téléphone électromagnétique sur le diaphragme *d* duquel appuie un levier *a* mobile autour d'un axe supérieur. Un contrepoids réglable permet de graduer la pression du levier. Ce dernier et le diaphragme sont reliés à une pile mise ainsi en court-circuit. Lorsque les courants ondulatoires du vibrateur parcourent la bobine du téléphone, dont la résistance mesure 100 ohms, les vibrations du diaphragme rendent le contact de celui-ci avec le levier défectueux, et une sonnerie dérivée sur la pile entre en mouvement. On peut aussi intercaler en dérivation un annonciateur, § 677, dont la chute indique l'appel.

**685. — Application du système.** — Le système Van Rysselberghe peut être appliqué de deux manières différentes :

1° Il est possible d'affecter à la téléphonie des lignes télégra-

phiques existantes en ***graduant*** les courants sur ces lignes et sur les lignes télégraphiques voisines; c'est le cas en Belgique, où, comme on l'a vu, § 646, les dépêches sont, en général, transmises directement de leur point d'origine au poste de destination. Il a donc fallu munir tous les postes du pays d'appareils graduateurs, ce qui, d'une part, apporte une certaine complication dans les installations des postes, multiplie les dérangements et rend leur recherche difficile, et, d'autre part, oblige à renforcer les piles de travail par suite des résistances supplémentaires que les courants ont à vaincre; le nombre d'éléments en service a été à peu près doublé en Belgique.

2° Ces raisons ont décidé plusieurs États à faire des lignes téléphoniques spéciales en fils doubles, munies de croisements en nombre suffisant pour n'avoir rien à redouter des courants télégraphiques voisins.

Chacun des fils de ces circuits spéciaux peut être utilisé pour une communication télégraphique par le système Van Rysselberghe. Tel est le cas des lignes Paris-Bruxelles, Paris-Marseille, Buenos-Ayres-Montevideo.

L'augmentation de la durée de la période variable occasionnée par les graduateurs ne diminue pas le rendement des appareils Morse et Hughes, mais on conçoit aisément qu'elle peut affecter des appareils plus rapides.

**686. — Système Pierre Picard.** — Le système suivant, employé en France, permet d'utiliser pour une communication télégraphique les deux fils formant un circuit téléphonique.

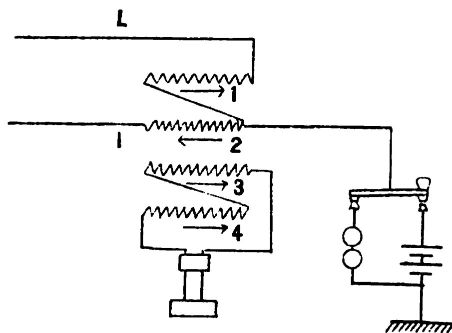



Fig. 439.

Au lieu de relier directement le poste téléphonique aux lignes L, *l* on intercale un translateur à 4 bobines égales 1, 2, 3, 4, enroulées dans le même sens sur un noyau unique, et connectées, comme l'indique la fig. 439, 1 et 2 avec le manipulateur, 3 et 4 avec le téléphone.

On voit que le courant télégraphique se bifurque suivant deux dérivations qui exercent des effets inducteurs égaux et inverses sur le circuit du téléphone. Par contre, les bobines 3 et 4 exercent des effets concourants sur les deux conducteurs de la ligne.

Ce système présente, par rapport au précédent, l'infériorité de ne fournir qu'une seule communication télégraphique pour deux fils et de réduire l'intensité des courants téléphoniques par l'emploi d'une double transformation.

## BUREAUX CENTRAUX.

**687. — Bureau central.** — Un réseau téléphonique comprend un certain nombre de postes téléphoniques reliés à des lignes convergeant vers un bureau central où elles peuvent être connectées deux à deux. Les administrations téléphoniques n'installent qu'un seul bureau dans une ville, sauf dans quelques agglomérations très étendues, où le réseau est parfois divisé en sections desservies chacune par un bureau spécial. Ces bureaux secondaires sont réunis entr'eux et à un bureau principal, au moyen d'un certain nombre de fils directs. Par cette disposition, le développement des conducteurs est beaucoup moindre que dans le cas d'un bureau unique. En revanche, en multipliant les bureaux secondaires, on augmente le nombre des manœuvres nécessaires pour relier deux abonnés n'appartenant pas à la même section, ce qui donne lieu à un retard dans les communications et à un accroissement des frais de main-d'œuvre. Aussi le second système n'est recommandable que pour les abonnés groupés dans diverses localités suburbaines.

Lorsque le réseau est aérien, le bureau central se trouve à l'un des étages supérieurs du bâtiment affecté au service. Le toit reçoit une grande charpente métallique en forme de tour, de laquelle partent les divers faisceaux de fils qui rayonnent vers les abonnés. Les

conducteurs sont prolongés par des câbles téléphoniques descendant à un premier commutateur à broches, où aboutissent également les câbles venant du bureau central. Ce commutateur permet d'interrompre, à un moment donné, un fil d'abonné pour l'essayer ou faire diverses transpositions exigées par le service. Il comporte des parafoudres ainsi que des commutateurs servant à mettre toutes les lignes à la terre en temps d'orage.

Dans le cas d'un réseau souterrain, le commutateur en question se trouve dans la cave où débouchent les câbles et le bureau central est au rez-de-chaussée.

**688. — Système des commutateurs suisses.** — Les systèmes d'installation et d'organisation des bureaux centraux qui ont été appliqués sont assez nombreux. A l'origine, tous les réseaux étaient à fils simples et les communications s'établissaient au moyen de commutateurs suisses, § 644.

Voici la description de ce système qui tend à disparaître.

Sur les murs de la salle des communications sont établis un certain nombre de commutateurs suisses, desservis chacun par un employé. Aux barres verticales aboutissent, après avoir traversé des annonciateurs, les fils des abonnés. Sur chaque lame verticale se trouve une fiche permettant de relier la lame avec l'une quelconque des lames horizontales. Une de celles-ci communique avec la terre; c'est sur elle que, normalement, sont placées toutes les fiches; une deuxième est reliée à une magnéto Siemens au moyen de laquelle l'employé envoie les courants d'appel vers les abonnés; une troisième, à un poste téléphonique servant à l'employé. Les autres lames sont isolées et permettent de relier entr'elles les lignes aboutissant au bureau. Pour que deux abonnés quelconques puissent être mis en communication, un certain nombre de lames de chaque commutateur sont prolongées jusqu'aux autres commutateurs; ces lames reçoivent la même couleur et portent le même numéro dans les deux commutateurs qu'elles mettent en relation, afin d'éviter autant que possible les erreurs.

Ces dispositions étant comprises, supposons qu'un abonné A veuille correspondre avec un abonné B. Il envoie sur la ligne un courant d'appel qui dégage son annonciateur au bureau central. L'employé du commutateur met la fiche de A sur la lame reliée au

téléphone de service et demande avec qui A veut communiquer. La réponse entendue, l'employé avertit l'abonné B, en mettant la fiche de cet abonné sur la lame de la magnéto, ou bien le fait appeler par un autre employé si B ne relève pas du commutateur qu'il dessert. Lorsque B a répondu, les broches des deux abonnés sont placées sur une même barre horizontale isolée et la conversation peut commencer, en même temps que l'employé relève les plaques des annonciateurs. Lorsque la communication est terminée, A et B sonnent, les annonciateurs basculent et l'employé replace les broches sur la barre de terre.

Les commutateurs suisses sont très encombrants. Le maintien des annonciateurs dans le circuit téléphonique réduit sensiblement la puissance de la voix. On les a remplacés par des commutateurs dits à *spring jacks*.

**689. — Spring jack.** — Chaque circuit, que nous supposerons à deux fils L, *l*, communique avec un élément de commutateur appelé spring jack ou simplement *jack*. Celui-ci se compose d'une lame élastique *r*, reliée à l'un des fils de ligne *l* et appuyant normalement sur un buttoir *b* qui communique avec la bobine de l'annonciateur de l'abonné. L'autre fil L est également attaché à cet

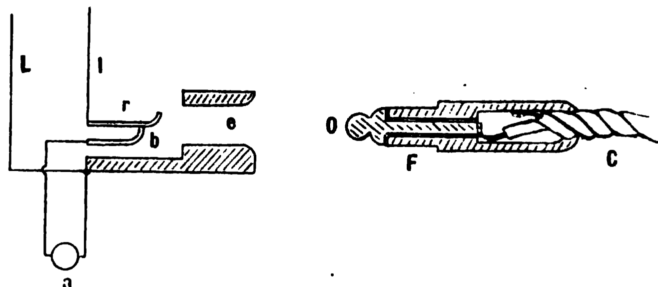



Fig. 440.

annonciateur, ainsi qu'à la garniture métallique d'un orifice *e*. En poussant dans cet orifice la fiche F, le bouton O qui termine celle-ci soulève la lame *r* et met le fil *l* en communication avec l'un des conducteurs d'un cordon souple C. L'autre conducteur, relié au corps de la fiche isolé du bouton, est mis en relation avec la garniture d'entrée du jack et partant avec le second fil L.

690. — **Tableau standard pour doubles fils.** — Les jacks et leurs annonciateurs sont groupés au nombre de 100 sur des panneaux verticaux accolés. Un certain nombre de doubles fiches sont affectées au raccordement de ces jacks et reliées à des commutateurs disposés sur le tableau et représentés dans la fig. 441.

Lorsqu'un des abonnés, A, du tableau appelle, l'employé qui voit la chute de l'annonciateur introduit une fiche F dans le jack correspondant et se met en relation avec l'appelant en manœuvrant un excentrique E qui déplace deux ressorts M, *m*. Par l'intermédiaire du cordon souple de F, l'agent relie ainsi A à son poste téléphonique T. Il saisit ensuite une seconde fiche *f*, reliée à la première, et l'enfonce dans le jack de l'abonné appelé B. Il appuie sur le bouton d'appel *c* et envoie sur le circuit de B le courant d'une

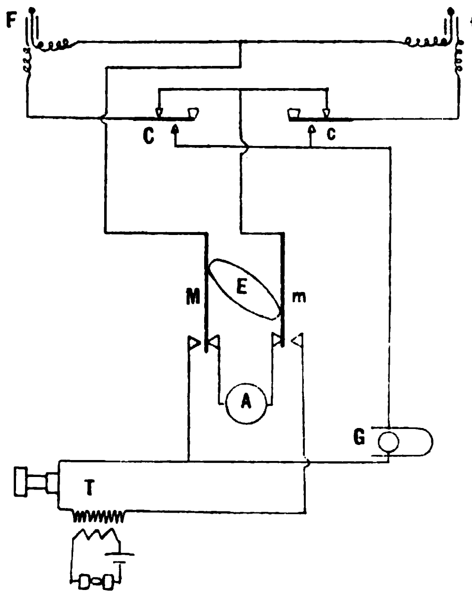



Fig. 441.

magnéto G. Quand B a répondu, l'excentrique E est séparé des lames M, *m*, et les circuits de A et de B demeurent directement réunis. On laisse ainsi en dérivation un annonciateur A, dit de fin de communication, que les courants de magnéto envoyés par A et B après la conversation font déclencher. On évite de la sorte de

mettre la résistance de l'annonciateur en circuit. Chaque tableau porte 10 doubles fiches avec les clefs correspondantes, ce qui suffit pour 100 jacks.

Si le nombre des abonnés dépasse 100, on accole des tableaux semblables raccordés entr'eux par des jacks et des fils de service. Lorsqu'une communication est demandée entre des abonnés raccordés à des tableaux différents, l'employé du tableau de l'abonné appelant doit interpeler l'employé du tableau de l'abonné appelé pour demander de faire la liaison par l'intermédiaire d'un des jacks de service.

Quand le nombre des abonnés dépasse 1200 à 1500, ces appels sont très fréquents, donnent lieu à des manœuvres assez complexes et augmentent les chances de fausses communications.

691. — **Tableaux multiples.** — Les tableaux multiples, imaginés par MM. Hoskins et Wilson et installés dans les bureaux très chargés, permettent à un seul employé de relier deux abonnés quelconques, quel que soit le nombre des circuits. On réduit ainsi de moitié le personnel des bureaux et le temps pris par l'établissement d'une communication.

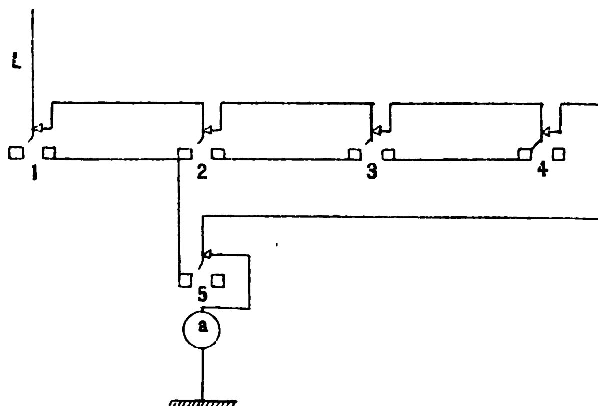
Nous examinerons le cas d'un réseau à fils simples, pour ne pas compliquer les diagrammes.

Chaque ligne d'abonné possède un jack sur chacun des tableaux. Ainsi, la ligne L, fig. 442, passe successivement par une série de jacks 1, 2, 3, 4, dits *jacks généraux*, reliés entr'eux, puis revient à un dernier jack 5, dit *individuel*, fixé à la partie inférieur de l'un des tableaux.

S'il y a 10000 lignes d'abonnés aboutissant au bureau et 100 abonnés par tableau, il y aura donc sur chaque tableau 10000 jacks généraux et 100 jacks individuels. Ceux-ci sont pourvus d'annonciateurs *a*. Les jacks généraux sont nécessairement très petits pour ne pas rendre le tableau encombrant : 20 jacks n'occupent qu'une surface de 29 cm sur 1,8 cm.

Lorsqu'un abonné A de l'un des tableaux appelle, son annonciateur tombe. L'employé pousse dans le jack individuel correspondant une fiche F, qui, dans le cas du simple fil, est massive et appuie au repos sur une tablette métallique *t* reliée à la terre. La fiche se met en contact avec le ressort du jack, en l'écartant de son buttoir. En

tournant l'excentrique, on met la ligne en communication par M et *m* avec le poste téléphonique local T. Après avoir écouté l'abonné appelant, l'employé pousse la fiche *f* dans le jack général



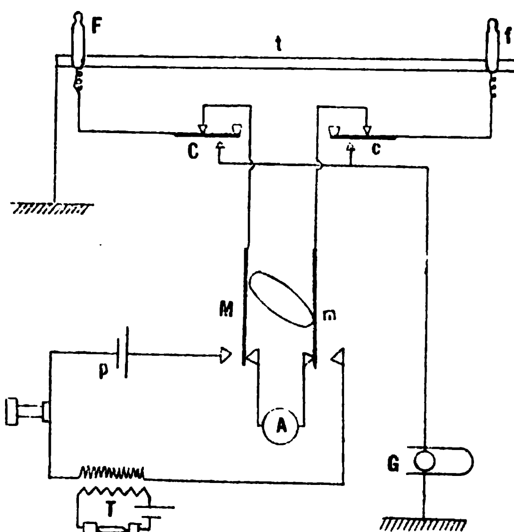




Fig. 442.

que l'abonné appelé B possède au tableau. Il sonne cet abonné, en appuyant sur la clef d'appel *c*, et, la réponse entendue, laisse les deux abonnés reliés entr'eux, en maintenant dans le circuit l'annonciateur de fin de communication A.

Mais l'abonné B peut se trouver déjà relié sur un autre tableau. Dans ce cas, l'introduction de la fiche $f$ dans le jack général, interrompt sa conversation. On évite cette difficulté au moyen d'un dispositif spécial qui permet de s'apercevoir si une ligne d'abonné est libre ou occupée. Les garnitures métalliques d'entrée des jacks d'une même ligne sont, comme le montre la fig. 442, reliées entr'elles, de manière à former ce qu'on appelle un *fil d'essai*. Lorsque la ligne de B est occupée, ce fil d'essai est relié à la terre par la fiche qui donne la communication et la ligne de B. Cela étant, si, pendant que l'excentrique met la fiche $f$ en relation avec le téléphone de l'employé, ce dernier touche un instant la garniture d'entrée du jack de l'abonné B avec cette fiche $f$, la pile d'essai $p$ envoie un courant momentané sur la ligne et fait entendre un *clic* dans le téléphone. Si ce bruit ne se produit pas, l'employé continue le mouvement et enfonce la fiche $f$ jusqu'à refus. On remarquera que le courant d'essai parcourt la ligne de B et celle de l'abonné en relation avec celui-ci, mais le courant, étant très court, n'affecte pas sensiblement la conversation de ces derniers.

Deux employés desservent un tableau de 100 jacks individuels.

**692. — Tableaux multiples diviseurs.** — On estime que les tableaux multiples permettent de desservir par un bureau central unique, système généralement suivi à l'heure actuelle, de 10 000 à 15 000 abonnés.

Vu la progression croissante du nombre des communications téléphoniques, il faudra, dans les grands centres, se préoccuper d'installer d'autres commutateurs. MM. Kellog et Bouchard ont proposé un système, dit *multiple diviseur*, dans lequel chaque abonné dispose de deux appels par courants opposés ; le premier appel correspond à une moitié des abonnés, le second à l'autre moitié. Ces deux appels arrivent à des employés différents, qui disposent chacun, non plus de la totalité des lignes, mais de la moitié seulement.

Ce système double la capacité du bureau. Dans les réseaux à fils doubles, on peut diviser les commutateurs en 4 et même en 8 groupes : la combinaison des deux fils et d'un retour par la terre avec les courants inversés se prête à huit appels différents.

**693. — Extension de la téléphonie.** — La téléphonie s'étend avec une rapidité justifiée par le fait que les services qu'elle rend sont proportionnés au nombre des abonnés qu'elle dessert.

Les tarifs téléphoniques sont de deux espèces. Dans la plupart des réseaux la taxe annuelle est uniforme pour tous les abonnés, ce qui simplifie la comptabilité du service. Dans quelques cas, on emploie la tarification proportionnelle au nombre des communications, ce qui semble plus rationnel, attendu qu'il est juste de faire payer en raison du service rendu. Ce système décharge les bureaux en engageant les abonnés à renoncer aux communications sans importance.

Le prix de revient des communications décroît d'abord lorsque le nombre des abonnés augmente dans un réseau, par suite de la diminution relative des frais généraux, mais, à partir d'un nombre donné, le prix tend à se relever parce que le travail du bureau central croît à peu près proportionnellement au carré du nombre des circuits reliés.

# ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

## LAMPES A INCANDESCENCE.

**694. — Production des radiations lumineuses. Expériences de M. Tesla.** — Les corps chauds émettent des radiations constituées par des mouvements vibratoires de l'éther. Suivant la période du mouvement, ces radiations se manifestent par des effets divers. Ainsi, lorsqu'on chauffe un conducteur, tel qu'un fil de platine, à l'aide d'un courant électrique, à une température ne dépassant pas 350° C, les radiations émises par le fil se décèlent par la propriété d'échauffer les corps voisins dont la température est plus basse. Le nombre de vibrations de ces ondes calorifiques s'élève jusque $400 . 10^{12}$ par seconde. Entre 350° et 450°, le fil commence à émettre des radiations qui, outre leur effet calorifique, sont susceptibles d'affecter la rétine; ce sont des rayons lumineux.

Si l'on continue à accroître l'intensité du courant, la couleur du fil passe progressivement du rouge sombre au rouge vif et au blanc incandescent. La décomposition de la lumière blanche par un prisme apprend que celle-ci est formée de la superposition de rayons simples qui, dans la partie lumineuse du spectre, correspondent à des vibrations dont le nombre varie entre $400 . 10^{12}$ et $800 . 10^{12}$ par seconde. Au delà du spectre visible, vers l'extrémité

violette, s'étend une bande de radiations qui se manifestent particulièrement par des actions chimiques, telles que la décomposition des sels d'argent. Le nombre des vibrations y atteint jusque $1600 . 10^{12}$ par seconde.

En résumé, à mesure que la température d'un corps s'élève, son spectre s'enrichit de radiations correspondant à des ondes de plus en plus courtes et qui se superposent. Toutes ces radiations se manifestent par des effets calorifiques et des effets chimiques, mais les seuls rayons qui agissent sur la rétine sont ceux dont la fréquence est comprise dans l'octave s'étendant entre $400 . 10^{12}$ et $800 . 10^{12}$ vibrations par seconde.

L'émission par un corps solide de radiations calorifiques correspond à une dépense d'énergie, dans une proportion qui ne s'écarte pas beaucoup de la première puissance de la température. A partir du moment où le corps commence à produire des rayons lumineux, la somme de lumière fournie croît au contraire beaucoup plus vite que la température; le rapport entre l'énergie des radiations lumineuses et celle des radiations totales croît aussi très rapidement avec la température. L'énergie des radiations totales s'estime en plaçant le corps dans un calorimètre opaque. En faisant ensuite usage d'un calorimètre transparent, les radiations lumineuses échappent à l'absorption en traversant les parois et sont déterminées par différence. La différence n'exprime cependant pas exactement les radiations lumineuses; le dixième environ des radiations obscures est absorbé par le liquide.

Le rapport mentionné ci-dessus n'est guère que de 0,00293 pour la flamme des bougies qui contient des particules de carbone incandescent noyées dans un gaz dont le pouvoir émissif est faible. L'équivalent mécanique de la chaleur dépensée par seconde dans une bougie est d'environ 86 watts.

Le courant électrique traversant un conducteur de faibles dimensions permet de développer une grande quantité de chaleur dans un faible volume, et, par suite, de produire une température très élevée, ce qui favorise l'émission des radiations lumineuses.

On arrive, par les lampes à arc voltaïque, à faire croître le rapport de l'énergie des rayons lumineux à celle des radiations totales jusque 0,1. La puissance requise pour produire la même lumière qu'une bougie tombe alors à 0,7 watt.

On voit l'énorme supériorité théorique des lampes électriques sur les anciens modes de production de la lumière ; elles dégagent beaucoup moins de chaleur et ne répandent aucun gaz délétère. Toutefois, une grande partie du bénéfice apporté par l'électricité est perdue par ce fait que nous produisons l'énergie électrique à l'aide de machines qui n'utilisent guère que le dixième de l'énergie du charbon brûlé dans les chaudières à vapeur.

Malgré leur supériorité relative, nos lampes électriques sont encore bien imparfaites, puisqu'elles ne transforment en lumière que la dixième partie de l'énergie électrique qu'elles absorbent. Les radiations obscures qu'elles émettent prennent les neuf dixièmes de cette énergie. Suivant l'heureuse comparaison de M. Lodge, on se trouve dans la situation d'un organiste qui, pour arriver à tirer quelques notes aiguës de son instrument, devrait souffler dans tous les tuyaux du clavier. Ainsi l'électricien, qui n'a besoin que des radiations dont les nombres de vibrations sont compris entre $400 . 10^{12}$ et $800 . 10^{12}$ par seconde, est obligé de provoquer toutes les vibrations plus lentes qui absorbent la plus grande partie de l'énergie dépensée.

Peut-on espérer d'arriver à éviter la production de ces radiations parasites ?

Le phénomène d'incandescence développe la série progressive des radiations calorifiques et lumineuses, tandis que les phénomènes auxquels M. Wiedemann a donné le nom générique de *luminescence* produisent une sélection d'ondes lumineuses. Lorsque cette sélection est accompagnée d'une température peu élevée, elle porte le nom de phosphorescence. La luciole cubaine, étudiée par MM. Langley et Very, concentre toutes ses radiations dans les limites étroites des rayons visibles du spectre, le maximum d'énergie rayonnée étant compris entre les rayons jaunes et les rayons verts. D'après M. Nichols (¹), certains oxydes, tels que ceux de magnésium et de zinc, émettent, lorsqu'ils sont fraîchement préparés et chauffés, une quantité de lumière très supérieure à celle de corps incandescents à la même température. Si l'on parvenait à régénérer de telles substances et à les amener à la température voulue, on

(¹) NICHOLS, *Electrician*, 5 décembre 1890.

obtiendrait des sources de lumière beaucoup plus efficaces que les conducteurs rendus incandescents par le courant.

On a vu, § 201, que les oscillations électriques déterminent des radiations qui jouissent de propriétés semblables à celles des rayons lumineux, et dont la fréquence, par seconde, peut s'élever à plusieurs billions, lorsqu'on emploie des vibrateurs très exigus. Si l'on parvenait à diminuer suffisamment les dimensions de ceux-ci, on donnerait aux ondes électriques la propriété d'agir sur la rétine, c'est à dire qu'on produirait directement des ondes lumineuses. Il faudrait pour cela que les vibrateurs fussent réduits aux dimensions moléculaires. Ce sont vraisemblablement des vibrations de ce genre qu'on obtient lorsqu'on soumet les tubes à gaz raréfiés à des décharges électriques ; celles-ci provoquent un bombardement moléculaire, dont l'effet est de rendre lumineuses les molécules des corps contenus dans les tubes et les parois de ceux-ci. La décharge électrique joue ici le même rôle que le moteur qui déplace un pendule de sa position d'équilibre, pour l'abandonner ensuite à ses oscillations. Comme les oscillations électriques s'amortissent rapidement, il faut répéter l'action motrice le plus souvent possible. Les interrupteurs ordinaires des bobines de Ruhmkorff laissent à désirer à cet égard, car leur période de vibration est incomparablement plus lente que celle des vibrations lumineuses.

M. Tesla est parvenu récemment à amplifier considérablement les effets obtenus dans les tubes à atmosphère raréfiée, en renouvelant rapidement l'excitation moléculaire. Il a employé des courants alternatifs de haute tension obtenus par deux procédés différents. Dans le premier cas, une bobine d'induction sans fer, isolée dans l'huile, a son primaire alimenté par un alternateur à pôles multiples, capable de produire 10000 périodes par seconde. Dans le second cas, on obtient des alternances beaucoup plus courtes encore en faisant passer dans le circuit primaire de la bobine le courant oscillatoire produit par la décharge d'un condensateur, § 451. On réalise par ce procédé jusque 200000 périodes par seconde. M. E. Thomson a remarqué qu'on peut accroître davantage la fréquence en dirigeant sur l'étincelle de l'excitateur de décharge un courant d'air produit par une soufflerie. Un long tube de verre dans lequel on a fait le vide s'illumine brillamment lorsqu'il

est présenté à l'une des électrodes secondaires de la bobine à alternances rapides ; le même tube s'éclaire également lorsqu'il est placé entre deux armatures de condensateur, raccordées aux bornes secondaires de la bobine. Les armatures peuvent d'ailleurs être très écartées l'une de l'autre, de manière à produire un champ électrostatique oscillant, dans lequel on peut promener le tube. On obtient de la sorte une curieuse lampe sans électrodes. Comme les gaz n'ont qu'un pouvoir émissif faible, M. Tesla a cherché à utiliser les vibrations de corps solides. Pour cela, il a, comme M. Crookes, placé des substances diverses dans des ampoules vides d'air. En mettant une tige de charbon en communication électrique avec une des bornes secondaires, le bombardement par les molécules d'air restant dans l'ampoule porte le corps à l'incandescence.

En admettant que ces procédés conduisent à des lampes d'une intensité lumineuse suffisante pour la pratique, il restera cependant la difficulté de transporter les courants de fréquence très élevée, pour lesquels les conducteurs présentent une impédance considérable.

**695. — Fabrication des lampes à incandescence.** — En principe, tout conducteur qui peut être amené par le courant à la température du blanc incandescent et qui supporte à l'air libre ou dans le vide cette température sans fusion ni désagrégation se prête à la réalisation d'une lampe à incandescence. Comme l'émission de la lumière se fait par la surface du conducteur, il y a intérêt à donner à celui-ci la forme d'un fil ou d'une bande mince, dont la surface est considérable relativement à la section. Parmi les métaux, les moins fusibles appartiennent à la famille du platine ; aussi a-t-on cherché à diverses reprises à utiliser ces métaux pour la fabrication des lampes. Malheureusement, le point de fusion du platine et de ses congénères est très voisin de la température de l'incandescence et tout accroissement accidentel du courant entraîne la perte du fil qu'il traverse. M. Edison a cherché à remédier à cet inconvénient à l'aide d'un régulateur automatique introduisant des résistances destinées à empêcher le courant de dépasser sa valeur normale ; mais cette disposition est compliquée et n'empêche pas la désagrégation plus ou moins rapide du filament.

Le corps qui paraît le mieux approprié au but en vue est le charbon: son pouvoir émissif est considérable, et il supporte dans le vide des températures plus élevées que tout autre conducteur. A l'inverse de celle des métaux, sa résistance électrique diminue quand la température augmente.

La difficulté de produire des filaments de charbon suffisamment minces et homogènes a été résolue par M. Edison et beaucoup d'autres inventeurs. En principe, le procédé consiste à carboniser en vase clos des fibres de cellulose naturelle ou artificielle plus ou moins pure.

Ces fibres doivent être très homogènes. On emploie actuellement des fils de coton parcheminé ou bien encore des filaments obtenus en passant une pâte de cellulose à la filière. Une telle pâte s'obtient en précipitant une dissolution de coton dans l'acide nitrique ou dans l'acide phosphorique à l'aide d'éther sulfurique et en éliminant les dernières traces d'acide. Parfois, la pâte, coulée sur une plaque de verre à la façon des préparations photographiques, est découpée en lanières minces. Mais les filaments ainsi préparés sont moins solides que les filaments ronds.

Pour opérer la carbonisation, on peut disposer les brins sur une forme en charbon, fig. 443, et les retenir par des ligatures. Ces



Fig. 443.

formes sont empilées dans un creuset et recouvertes de poussier de charbon pour empêcher l'accès de l'air pendant la cuisson. Les filaments carbonisés conservent la forme de leur support.

Actuellement on soumet toujours le filament à une opération appelée *flashing* ou *renforcement*, qui a pour but de le consolider, de régulariser sa section et lui donner une surface compacte et homogène. Le renforcement se fait en envoyant un courant électrique dans le filament préalablement plongé dans un hydrocar-

bure gazeux, au milieu d'un flacon où l'on entretient un vide partiel avec une pompe pneumatique à piston Lorsque, sous l'effet du courant, la température du fil de charbon a atteint le blanc, l'hydrocarbure se décompose et le carbone se précipite sur le filament en le couvrant d'une couche graphitoïde, dure et compacte, d'un gris d'acier, analogue au dépôt qui se produit sur les cornues à gaz pendant la distillation de la houille. La précipitation du carbone s'observe particulièrement sur les parties du fil dont la section est la plus faible, attendu que le courant les échauffe davantage en vertu de leur résistance plus grande. Le renforcement tend donc à rendre homogène la surface et la section. En outre, la couche brillante déposée jouit d'un pouvoir émissif notablement plus grand que la surface terne que possède le fil après la carbonisation.

La conductibilité électrique du charbon déposé est beaucoup plus grande que celle du noyau ; aussi peut-on suivre exactement l'opération, dans une lampe soumise à une différence de potentiel constante, par l'accroissement du courant dû à la diminution rapide de la résistance du filament.

Le filament préparé et courbé en fer à cheval ou en boucle est soudé à des fils de platine sur lesquels on a, au préalable, écrasé les parois d'un tube en cristal destiné à servir de support aux fils. Par sa composition, le tube doit avoir le même coefficient de dilatation que le métal, de manière à ce que l'étanchéité des orifices d'entrée soit assurée à toutes températures. Afin de s'assurer de l'observation de cette condition, quelques compagnies fabriquent elles-mêmes le cristal employé à la confection des lampes.

La soudure du filament avec le platine peut se faire par un procédé analogue au renforcement. On chauffe les jonctions dans un hydrocarbure liquide à l'aide d'un courant amené par des pinces de façon à limiter convenablement son action ; le carbone se précipite sur les joints et forme un bourrelet solide et conducteur. D'autres fois, la soudure se fait par une pâte charbonneuse qu'on sèche et carbonise.

Le tube supportant le filament est ensuite soudé dans une ampoule en verre pouvant communiquer par un orifice étroit avec une pompe pneumatique à mercure, capable de produire un vide voisin de 0,01 mm de mercure. On se sert d'appareils pro-

duisant le vide barométrique (pompe Geissler) ou de trompes à mercure (pompe Sprengel) qui possèdent l'avantage d'avoir une action continue. Ces pompes ont l'inconvénient d'être fragiles, coûteuses et lentes. Il est logique de ne les employer que pour compléter le vide, après avoir, au préalable, relié l'ampoule à une pompe à piston pour extraire la majeure partie de l'air qu'elle contient. On annonce même qu'on est arrivé à supprimer complètement les pompes à mercure grâce aux pompes à piston étagées de manière à produire des raréfactions croissantes et à éviter l'importance des rentrées d'air par les joints, les deux faces du piston de chaque cylindre communiquant avec des réservoirs à des pressions peu différentes.

La pompe a pour objet d'extraire non seulement l'air de l'ampoule, mais aussi celui qui est condensé dans le filament, le charbon jouissant de la propriété d'absorber un volume gazeux très supérieur à son volume propre. Il est nécessaire d'extraire l'air occlus pour empêcher la combustion du filament soumis à l'action d'un courant intense, ainsi que pour éviter la désagrégation due à l'effet mécanique suivant. Supposons pour un instant que le fil de charbon soit enfermé dans une ampoule fermée et privée d'air. Au moment où il est porté à l'incandescence par le courant, les gaz occlus atteignent une pression excessive et s'échappent en brisant leur enveloppe et en entraînant avec eux des parcelles de charbon. Lorsque l'action du courant cesse, le phénomène d'absorption se reproduit ; une nouvelle application du courant entraîne une nouvelle perte de carbone. Cette action répétée finit par mettre le filament hors d'emploi et par amener sa rupture, en même temps que l'on constate un noircissement rapide de l'ampoule par suite du dépôt de charbon.

Vers la fin de l'opération d'extraction de l'air, on soumet le filament à un courant croissant progressivement jusqu'à donner à la lampe un éclat supérieur à l'éclat normal. L'échauffement des fils de platine peut alors amener le cristal qui les touche à une température voisine de 300° C, limite à laquelle le cristal commence à se décomposer sous l'effet d'un courant continu. Le plomb se rend à la cathode qu'il noircit, tandis que l'anode donne lieu à un dégagement gazeux qui amène des rentrées d'air dans l'ampoule. On évite ce phénomène par l'emploi de courants alter-

... la lampe. L'effet combiné de la chaleur et de ... détermine l'expulsion de la majeure partie des gaz ... chauffe vers 300° l'ampoule elle-même, afin d'ex... ...ent. Sous l'influence du traitement qu'on vient ... de du charbon se resserre et le filament devient ... plus solide.

...nique décrit plus haut n'explique qu'en partie la ... du carbone, laquelle se produit d'une manière con... ...fet de la chaleur. D'après les recherches de M. F. ...mpérature de régime des lampes à incandescence est ... 1700° C. Lorsque la température dépasse 1600°, la désa... ...est très active et le globe est susceptible d'être noirci en ... instants. Il semble, en outre, y avoir un effet de répulsion ... dans la projection des particules de charbon sur le globe. ... a découvert qu'en interposant une plaque de platine ... deux brins d'un filament en fer à cheval porté à l'incandes... ... le courant, et en reliant la plaque, à travers l'ampoule, ...galvanomètre sensible pendant que le brin positif est relié ... seconde borne du galvanomètre, ce dernier accuse un courant ... positif à la plaque à travers le vide de l'ampoule. Aucun ... ne se manifeste entre la plaque et le brin négatif. M. Fle... qui a donné à cette expérience des formes diverses, attribue ... observé à une désagrégation du brin négatif et à la répulsion ... molécules de carbone chargées négativement sur la plaque ... électrisent.

...es expériences faites par M. Hess ont montré que, pour obtenir ... bon rendement lumineux, la pression ne doit jamais dépasser ... mm de mercure, sans quoi la conductibilité calorifique de l'air ... l'ampoule provoque la perte d'une certaine quantité d'énergie.

M. Higgins a essayé deux lampes dans l'une desquelles le vide ...ait poussé aussi loin que possible, tandis que dans l'autre la ...pression atteignait 2,5 mm de mercure. Les filaments étant portés au rouge, l'ampoule de la première accusait la température de ... C, celle de la seconde 250° C. Pour amener les filaments à l'incandescence, la dépense d'énergie était de 4 watts par bougie dans le premier cas, et de 15,2 watts dans le second.

Lorsque l'action de la pompe à air est terminée, ce dont on juge par le bruit sec que produisent les gouttelettes de mercure dans la

pompe, il suffit de sceller l'orifice de sortie de l'ampoule et d'appliquer à l'embase de celle-ci le dispositif particulier nécessaire pour relier la lampe aux conducteurs qui amènent le courant.

A cet effet, la lampe se place sur un support, douille ou socket, auquel aboutissent les fils d'alimentation. Le mode de fixation au support doit être simple, solide et de nature à éviter les contacts défectueux qui donnent naissance à des échauffements et à des étincelles nuisibles.

On vérifie le vide des ampoules en présentant celles-ci, dans la chambre noire, à l'une des électrodes secondaires d'une bobine de Ruhmkorff. Si le vide est parfait, il ne se produit pas d'effluve dans la lampe. Un léger résidu d'air, admissible, détermine une effluve sur la paroi du verre, par suite du choc contre cette paroi des molécules mises en vibration. Un excès d'air occasionne un nuage blanc dans l'ampoule. Cet effet est dû à la rencontre des molécules d'air au sein de l'ampoule.

L'effluve ne se produit pas dans une lampe contenant un grand excès d'air, mais, dans ce cas, des vibrations mécaniques imprimées au filament durent beaucoup moins longtemps que si l'ampoule est vide.

On peut faire des lampes à incandescence de toutes dimensions, donnant des intensités lumineuses variant d'une faible fraction de bougie à plusieurs milliers de bougies. Les lampes les plus répandues donnent de 10 à 25 bougies décimales (voir étalons photométriques). On emploie parfois des lampes à gros filaments, dont l'intensité moyenne est de 100 à 500 bougies. Les tensions habituelles pour lesquelles on calibre les lampes sont de 50, 65 et 100 volts. Pour les distributions par courants triphasés, on est amené à employer des lampes comprenant trois brins réunis entr'eux par un bout commun et communiquant avec les trois conducteurs d'amenée des courants par leurs bouts libres. On égalise ces trois brins en les *renforçant* dans un gaz carburé sous l'influence de courants triphasés.

**696. — Modes d'alimentation et durée des lampes à incandescence.** — Généralement, les lampes à incandescence sont alimentées par des conducteurs maintenus à une différence de potentiel constante, entre lesquels elles sont disposées en dérivation ; d'où la

nécessité d'accroître autant que possible la résistance des filaments en vue d'augmenter la tension et, par suite, de réduire la section des conducteurs. On n'a guère dépassé la différence de potentiel de 150 à 200 volts qui conduit, pour les lampes d'intensité lumineuse moyenne, à des filaments longs et fragiles, susceptibles de se briser par les chocs, particulièrement lorsque les lampes sont allumées et que les vibrations mettent en court-circuit une partie du filament. On a cherché à limiter les déplacements de celui-ci par des crochets en platine scellés dans le verre de l'ampoule.

Quelques électriciens ont préconisé la distribution des lampes en série dans les circuits parcourus par des courants constants. On cherche alors à réduire la tension aux bornes des lampes, en donnant à celles-ci des filaments courts et peu résistants, afin de ne pas atteindre des différences de potentiel excessives aux pôles des générateurs. Dans une distribution en série, il faut prévoir un appareil automatique mettant les lampes en court-circuit lorsqu'elles viennent à se briser.

Comme moyen terme, on groupe parfois en dérivation des séries de 2 lampes. Cette disposition n'est pas recommandable parce que si l'on substitue à l'une des lampes d'une série, dont le filament a été aminci par l'usure, une lampe neuve moins résistante, la tension aux bornes de la vieille lampe restante est notablement accrue, ce qui détermine sa rupture immédiate. Cet inconvénient ne s'observe pas au même degré s'il y a cinq ou six lampes dans chaque série et surtout si l'on emploie les conducteurs intermédiaires décrits au § 484.

La régularité de la différence de potentiel appliquée aux bornes des lampes a une grande influence sur leur durée. Les variations dépassant de 1,5 à 2 pour 100 la tension normale réglée par des essais photométriques accélèrent l'usure des lampes. Si l'on dépasse de 10 pour 100 la tension normale la durée de la lampe est considérablement réduite, de même qu'un accroissement analogue de la température du corps humain détermine rapidement la mort. On a remarqué que l'emploi des accumulateurs est favorable à la conservation des filaments. A première vue, les courants alternatifs paraissent défavorables, mais l'expérience semble avoir établi qu'ils ne sont pas inférieurs à cet égard aux courants des machines continues. La capacité calorifique des filaments limite

les variations de température sous les fréquences de courant habituellement employées.

Les diverses parties des filaments s'amincissent avec le temps et l'on observe une diminution graduelle dans l'éclat d'une lampe soumise à une différence de potentiel constante. Nous reviendrons sur ce point à propos des mesures photométriques.

Après avoir décrit les procédés généraux employés actuellement pour la fabrication des lampes, nous donnerons la description de quelques procédés particuliers, dont certains tendent du reste à être abandonnés et n'ont plus qu'un intérêt chronologique.

697. — **Lampe Edison.** — Le filament de la lampe Edison est obtenu par la carbonisation d'une languette aplatie de bambou.

On donne aux filaments la forme d'un fer à cheval ou la forme d'une boucle, fig. 444. La boucle occupe moins d'espace en hauteur que le fer à cheval. Elle est, en outre, plus avantageuse au point de vue de l'impression sur l'œil et présente une répartition lumineuse plus uniforme dans les diverses directions horizontales.

Les languettes sont placées dans des moules empilés dans un four et recouverts de charbon pulvérisé. De cette manière, on évite



Fig. 444.

l'accès de l'air pendant la carbonisation. Dans les premières lampes Edison, la soudure du filament avec les fils de platine donnant accès au courant s'obtenait par un dépôt galvanoplastique de cuivre.

Actuellement, le joint est recouvert d'un dépôt charbonneux séché, puis carbonisé. Par économie, les fils de platine ont justement la

longueur nécessaire pour traverser le tube de support en verre. Ils sont prolongés à l'extérieur par des fils de cuivre soudés à l'embase de la lampe. Afin de permettre de fixer la lampe sur un support, on coule à la base de l'ampoule une gaîne de plâtre portant latéralement une vis estampée dans une tôle mince de laiton et, sur le fond, un piton de même métal, fig. 444. Ces pièces métalliques sont soudées aux extrémités des fils de cuivre reliés au filament.

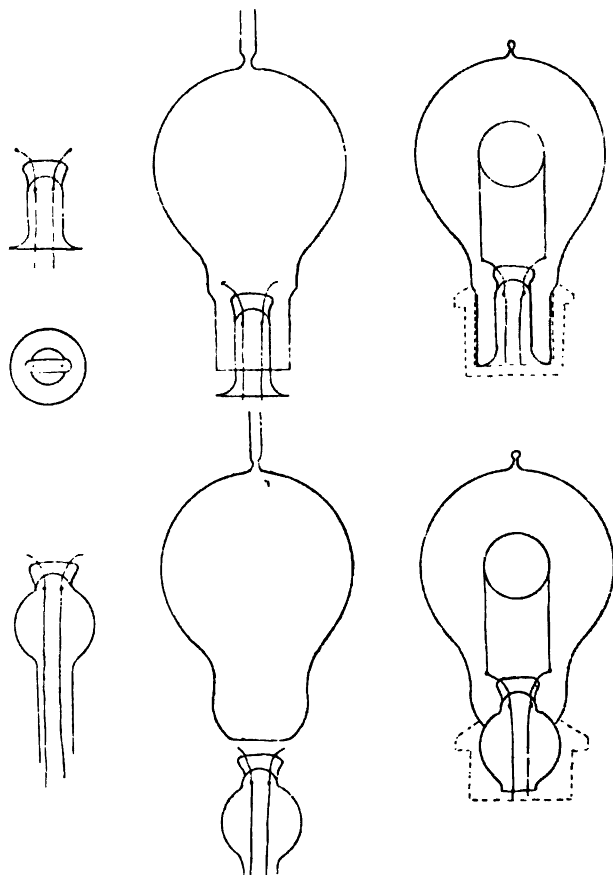


Fig. 445, 446, 447, 448, 449 et 450.

Les fig. 445, 446, 447, 448, 449 et 450 montrent deux modes différents de fabrication de l'ampoule et du support du filament. Dans les fig. 448, 449, 450, qui représentent le premier procédé

employé, les électrodes métalliques pénètrent dans la lampe par l'extrémité renflée d'un tube en verre écrasé à sa partie supérieure. M. Faraday Proctor a simplifié le montage du support ainsi que le montrent les fig. 445, 446, 447. L'adhérence de la garniture en plâtre représentée en pointillé est mieux assurée dans ce dernier modèle.

La lampe se visse sur un support dont la surface latérale interne porte une feuille de laiton, emboutie de manière à correspondre aux filets de la vis de la lampe. Le fond du support est couvert d'une plaque de métal sur laquelle appuie le piton. Parfois, on munit la douille d'une clef d'interruption qui permet d'éteindre et d'allumer la lampe à volonté. La douille Edison et très satisfaisante aux points de vue de la solidité et de l'efficacité du contact; elle peut se visser sur un tube par lequel arrivent les conducteurs reliés à la canalisation.

**698. — Lampe Swan.** — Le filament de cette lampe, courbé en boucle, s'obtient en carbonisant un faisceau de fibres de coton, préparé par une immersion dans l'acide sulfurique dilué.

Les extrémités du filament sont soudées par un dépôt charbonneux à des fils de platine réunis par un petit pont en verre [1]. Une

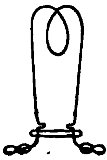


Fig. 451.

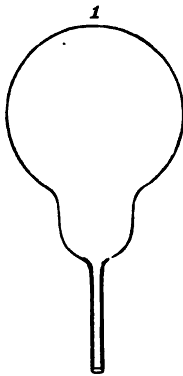



Fig. 452.

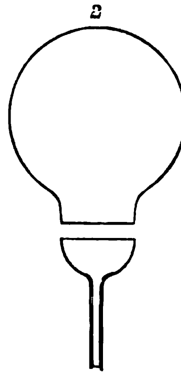



Fig. 453.

[1] Gordon, *A practical treatise of electric lighting*, p. 68.

ampoule soufflée à la verrerie suivant la forme indiquée dans la fig. 452 est ensuite coupée comme le montre la fig. 453.

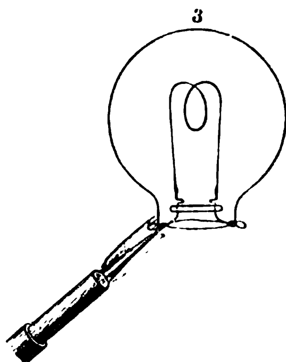



Fig. 454.

Les fils de platine sont soudés au chalumeau avec les bords de l'ampoule, puis les deux parties de celle-ci sont réunies de nou-

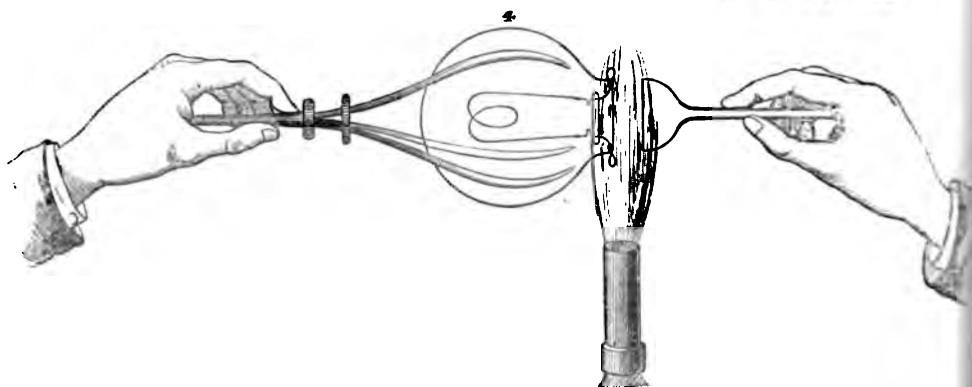



Fig. 455.

veau de manière à donner à la lampe la forme indiquée dans la fig. 456. La tubulure inférieure sert à introduire le gaz pendant le renforcement du brin charbonneux, puis à effectuer le vide autour de celui-ci pendant qu'il est soumis à une température croissant jusqu'à l'incandescence.

Actuellement, on abrège la fabrication de la lampe en soudant par écrasement les fils de platine dans un tube en verre, puis

en fixant ce tube à l'embase d'une ampoule pourvue d'une tubulure supérieure servant à faire le vide.

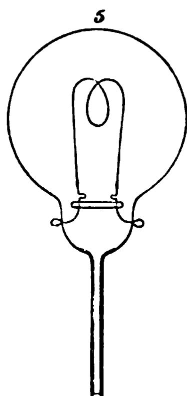


Fig. 456.

Le support de la lampe Swan est très simple. Les extrémités des fils de platine, recourbées en œillets *a, a'*, sont saisies par des crochets *b*, *b'*, reliés aux bornes A, B auxquelles s'attachent les

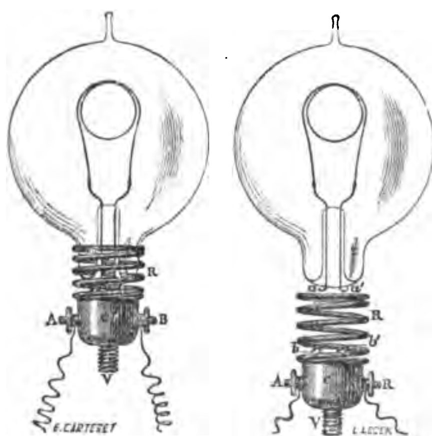



Fig. 457.

conducteurs d'alimentation. Pour assurer le contact, on interpose entre la lampe et son support un ressort à boudin R qui tend à les maintenir écartés. Ce système présente une certaine élasticité qui

garantit la lampe contre les chocs brusques qui pourraient provoquer la rupture du filament incandescent. Mais les surfaces de contact sont restreintes et il arrive souvent que le ressort tire inégalement sur les crochets; l'un des contacts devient alors défectueux et donne lieu à des étincelles qui fondent le fil de platine.

**699. — Lampe Victoria.** — Le filament en fer à cheval est une fibre de chiendent carbonisée. Des têtes de vis *d*, fixées aux extrémités du filament, viennent buter sur des ressorts P, P' reliés au circuit électrique. Des rainures de bayonnette *h*, traversées par des goupilles *f*, *f'*, assurent la lampe dans sa position de contact. Une autre disposition, représentée fig. 460, comporte une attache analogue à celle de la lampe Swan. Le ressort à boudin de cette dernière est remplacé par un épanouissement étoilé, formé de deux pièces à charnières qui sont pressées contre l'ampoule par une bague élastique. Les embases de la lampe Victoria sont d'aspect très gracieux.

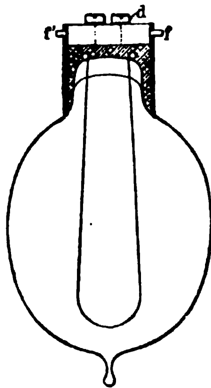


Fig. 458.

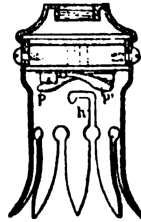
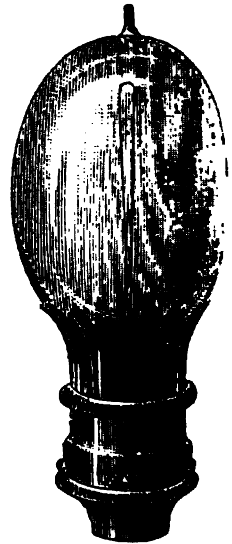


Fig. 459.


Fig. 460.

**700. — Lampe Cruto.** — *Premier procédé.* M. Cruto avait imaginé de recouvrir de charbon, par l'opération du renforcement, un fil de platine extrêmement ténu (0,01 mm de diamètre) obtenu

par le procédé Wollaston. Dans ce procédé, le platine, passé à la filière jusqu'au diamètre de 0,03 mm environ, est recouvert d'un dépôt d'argent, tréfilé de nouveau, puis plongé dans l'acide nitrique qui dissout la gaîne d'argent.

Pendant le renforcement du fil de platine placé sous l'action du courant dans un milieu hydrocarburé, la résistance électrique diminue au fur et à mesure que le dépôt s'épaissit et l'intensité du courant augmente progressivement. Lorsque le dépôt a acquis l'épaisseur voulue, ce qu'on reconnaît à l'intensité atteinte par le courant sous une différence de potentiel donnée, on pousse la tension jusqu'à la volatilisation du support de platine; ce dernier se combine au carbone.

Par suite de la flexibilité du fil de platine, la boucle tend à se déformer, lors de l'envoi du courant, sous l'action électromagnétique due au magnétisme terrestre. Il est difficile d'obtenir, dans ces conditions, des boucles régulières comme celles que présentent les autres lampes. La grande surface d'émission de ces filaments leur assure un bon rendement lumineux.

*Second procédé.* Le procédé qu'on vient de lire est assez coûteux, car il exige des fils de platine spéciaux et entraîne un renforcement prolongé pendant lequel la consommation d'énergie électrique et les frais de surveillance sont élevés. M. Cruto y a substitué le système suivant, beaucoup plus économique.

A une dissolution filtrée de 80 grammes de sucre dans 200 grammes d'eau distillée, on ajoute, goutte à goutte, 300 grammes d'acide sulfurique. La liqueur rouge et épaisse est additionnée d'eau jusqu'à la densité correspondant à 2° Baumé, l'uniformité du mélange étant assurée par une agitation continue. On filtre, et la pâte obtenue est passée à la filière. Les filaments ainsi produits sont séchés à l'air, puis à l'étuve, et enfin carbonisés dans des moules remplis de poussier de charbon de bois. Les fils de charbon retirés du four sont renforcés et traités par l'action combinée de la chaleur et du vide, comme on l'a vu précédemment.

701. — **Lampe Seel.** — La matière première des filaments est constituée par des brindilles enlevées aux stipes d'une sorte de palmier appelée Piassava. La partie blanchâtre de ces brindilles doit être enlevée; le reste est amené à l'épaisseur voulue par le

passage répété entre un support et une échancrure triangulaire pratiquée dans le fil d'un couteau. Les filaments réguliers ainsi obtenus, découpés à la longueur convenable, sont fixés par leurs extrémités, à l'aide de cire à cacheter, sur une forme en charbon. Celle-ci est une plaque rectangulaire, présentant vers l'un des bords une fente parallèle à celui-ci, de manière à isoler une tige autour de laquelle on enroule une fois le milieu du filament. Ainsi se trouve assurée simplement la forme en boucle de ce dernier. Les formes, garnies de filaments, sont empilées dans des moules avec de la poudre ténue de plombagine et le tout est porté au four à carboniser. Les filaments charbonneux sont alors placés sous une cloche en verre, qu'on remplit plusieurs fois de gaz d'éclairage, après y avoir fait le vide.

Dans cet état, le filament est soumis à une différence de potentiel capable de le porter à l'incandescence. Précédemment très résistant et fragile, il acquiert ainsi de la dureté et de l'élasticité, devient gris-clair et sa résistance diminue rapidement. On arrête le courant quand celui-ci a atteint une intensité convenable.

Deux fils de platine sont emprisonnés dans une gouttelette de verre; leurs extrémités supérieures sont aplaties et roulées en tubes dans lesquels on introduit les bouts du filament. On garnit le joint de pâte de charbon qu'on sèche à l'étuve. Le système est alors soudé dans une ampoule en verre qu'on recuit après la soudure. Le sommet de l'ampoule présente un tube par lequel on la relie à une pompe à air, destinée à commencer l'opération du vide. Celui-ci est poussé aussi loin que possible à l'aide d'un appareil à mercure donnant le vide barométrique; vers la fin de l'opération, on établit un courant croissant à travers le filament.

**702. — Support Westinghouse.** — On a représenté, dans les fig. 461 et 462, les détails du support à clef employé par M. Westinghouse. La lampe se termine par une douille saisie latéralement et retenue par l'épanouissement du support, tandis qu'un piton métallique, en relation avec une des extrémités du filament, pénètre entre deux lames de ressort destinées à assurer un bon contact. Une clef à excentrique permet de réunir deux autres lames représentées à la partie inférieure de la fig. 461. Les Américains font grand usage de ces clefs, analogues à celles des lampes à gaz,

dans les éclairages privés. En Europe, on préfère, en général, employer un commutateur spécial pour une ou plusieurs lampes et placé, dans l'appartement à éclairer, en un endroit d'un accès facile, près de la porte d'entrée par exemple. Cette disposition



Fig. 461.



Fig. 462.

exige un développement plus grand du circuit, mais elle est plus commode que la précédente. Le commutateur peut être rendu visible dans l'obscurité par un enduit phosphorescent.

703. — **Monture Grivolas.** — Les fig. 463 à 465 montrent les détails de la monture imaginée par M. Grivolas pour les lampes à incandescence. Les fils Z, Z, qui amènent le courant, sont fixés à des pitons A, A mobiles dans le sens vertical et sollicités vers le

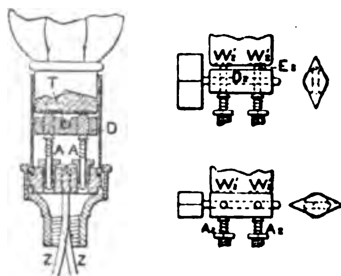



Fig. 463. Fig. 464. Fig. 465.

haut par des ressorts à boudin. La lampe, qui se fixe sur son support par un mouvement de bayonnette, porte, à la partie inférieure, deux contacts métalliques $W'_2$, $W'_2$ reliés au filament. Dans la fig. 463 on voit, en dessous de ces contacts, un disque commutateur D, mobile autour d'un axe vertical et possédant deux tiges

métalliques verticales qu'on peut, à l'aide d'une clef T, amener dans une position telle qu'elles fassent communiquer les pitons A avec les contacts $W'_2$. Les fig. 464 et 465 indiquent une autre disposition. La clef $D_2$ est un cylindre en ébonite mobile autour d'un axe horizontal et traversé par deux goupilles susceptibles de relier le filament aux conducteurs amenant le courant. La fig. 464 représente la position de contact; la fig. 465 celle d'interruption.

Dans les supports sans clef, ces dispositifs sont supprimés et les contacts $W'_2$ appuient directement sur les pitons $A_2$.

704. — **Lampe Bernstein.** — M. Bernstein, l'un des promoteurs de l'alimentation en série des lampes à incandescence, emploie des filaments courts et peu résistants obtenus par la carbonisation de tubes en tissus de soie ou en pâte de charbon.

La forme tubulaire sert à accroître autant que possible la surface éclairante. Malgré cette disposition, la grosseur du filament ne se prête pas à un rayonnement aussi considérable que celui existant dans les lampes précédentes. En outre, la perte de calorique par les supports du charbon réduit le rendement lumineux du système.

Le filament *a*, de forme rectiligne, est porté par des fils métalliques *b*, $b_1$ servant à amener le courant, fig. 466. Afin d'assurer la

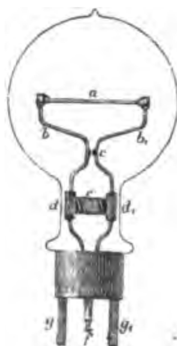



Fig. 466.

continuité du circuit des lampes, lorsque le filament vient à se briser, un ressort *e*, isolé des fils *b*, $b_1$, tend à rapprocher ceux-ci. Lors d'une rupture, le circuit se ferme aussitôt par le contact *c*.

Le support porte également un dispositif en vertu duquel un court-circuit se produit au moment où l'on retire la lampe pour la remplacer.

705. — **Réparation des lampes à incandescence. Procédé Pauthonnier.** — La durée limitée du filament des lampes à incandescence et le noircissement de l'ampoule par la volatilisation lente du charbon sont des inconvénients graves et tout procédé pratique tendant à y remédier mérite un sérieux examen. C'est à ce titre que nous indiquerons la méthode imaginée par M. Pauthonnier. L'expérience dira si la main-d'œuvre du procédé est compatible avec le bas prix actuel des lampes à incandescence.

La lampe défectueuse est percée, à la partie supérieure, d'un orifice suffisant pour l'introduction d'un filament de rechange. Le filament à remplacer est coupé à un millimètre environ des supports de platine. Les extrémités du brin nouveau sont amenées successivement contre les bouts restants et y sont soudées dans une atmosphère hydrocarburée par le procédé déjà décrit. Cela fait, on blanchit le globe à la flamme, de manière à lui rendre son éclat primitif, on y soude un ajutage par lequel on fait le vide et on termine l'opération comme avec une lampe neuve.

## LAMPES A ARC VOLTAÏQUE.

706. — **Phénomène de l'arc voltaïque.** — Le courant qui traverse une lampe à incandescence doit être modéré dans la crainte de produire une désagrégation rapide du filament, et l'intensité normale qu'on tolère est bien inférieure à celle qui produit le rendement lumineux maximum de la lampe, comme on le verra par les mesures photométriques. Pour atteindre tout l'effet lumineux dont le charbon est susceptible, il est nécessaire de sacrifier la matière en poussant l'incandescence jusqu'au degré de température où elle se volatilise rapidement.

C'est là le résultat obtenu dans l'arc voltaïque, produit pour la première fois par Davy dans les conditions suivantes. Ce savant relia les deux pôles d'une pile puissante à deux bâtons de charbon de bois en contact. En séparant progressivement les charbons, il

constata que les pointes voisines, amenées au blanc éblouissant, étaient réunies par un flot de gaz incandescent, courbé par le courant d'air chaud ascensionnel et auquel il donna, pour cette raison, le nom d'arc voltaïque.

Le charbon de bois se consumant rapidement, on l'a d'abord remplacé par du charbon taillé dans le dépôt qui se forme contre les parois des cornues à gaz pendant la distillation de la houille. Les crayons tirés de cette matière sont très durs, mais ils ont une grande porosité et renferment des impuretés qui se volatilisent dans l'arc en le refroidissant et en produisant des vacillations et des changements de coloration dans la lumière. Actuellement, on emploie exclusivement du charbon artificiel, obtenu par l'agglomération de poussier de coke très pur à l'aide d'une matière susceptible de laisser un résidu de charbon par la cuisson en vase clos.

707. — **Étude de l'arc voltaïque.** — L'arc voltaïque peut être considéré comme une étincelle électrique entretenue par la volatilisation du charbon, qui produit entre les pointes voisines des crayons une atmosphère rendue conductrice par sa température excessive. Cette conductibilité permet de maintenir l'arc avec une tension entre les deux charbons inférieure à 50 volts, alors qu'il faudrait à l'électricité une tension énorme pour franchir un intervalle semblable dans l'air à la température ordinaire. Aussi est-il nécessaire de mettre les charbons en contact et de les écarter progressivement pour amener l'arc voltaïque à la longueur voulue.

Lorsque le phénomène se produit dans le vide ou dans un gaz neutre, on constate un transport de matière dans le sens du courant; le charbon en relation avec le pôle positif du générateur se consume en se creusant, tandis que le charbon négatif se couvre d'une protubérance résultant de l'accumulation de la matière transportée. En même temps, on observe que du carbone volatilisé se condense contre les parois du récipient qu'il obscurcit rapidement. N'était cet effet, on trouverait avantage à développer l'arc dans un gaz neutre, afin de diminuer l'usure des charbons.

L'arc proprement dit a une teinte bleuâtre. Dans l'air, il est entouré d'une flamme rougeâtre due à la combustion du charbon volatilisé. Dans les grands arcs, cette flamme s'élève latéralement en léchant le crayon supérieur. Les extrémités des charbons, chauffées par le voisi-

nage du foyer, sont brûlées par l'oxygène de l'air et affectent une forme tronconique d'autant plus marquée que les crayons sont moins denses; toutefois, l'apparence des deux bouts n'est pas la même sous l'action d'un courant continu. Le charbon positif qu'on met généralement à la partie supérieure se creuse en forme de *cratère*, tandis que le crayon négatif prend une forme arrondie. Lorsque les crayons ont même diamètre et même composition, on constate que le charbon positif s'use environ deux fois plus vite que le charbon négatif. La température du cratère est telle que le charbon s'y ramollit et devient susceptible de recevoir des empreintes ou de se souder à la pointe négative, lorsque celle-ci est amenée au contact du crayon positif.

L'observation montre que l'arc proprement dit est bien moins brillant que les extrémités des charbons et, particulièrement, que le cratère du charbon positif, qui est le véritable foyer lumineux. Sur la somme de lumière fournie par l'arc, 10 pour 100 sont dus au crayon négatif et 5 pour 100 à l'arc lui-même. Le spectre de l'arc contient toutes les couleurs du spectre solaire ; il renferme de même les rayons ultra violets particulièrement propres aux réactions chimiques, entr'autres à celles qui s'élaborent dans les tissus des végétaux pendant la croissance de ceux-ci et à celles qui servent de base à la photographie. Les arcs très puissants produisent sur la peau le phénomène particulier désigné sous le nom de *coup de soleil*.

Le spectre de l'arc est coupé de raies brillantes provenant particulièrement de la vapeur de carbone. M. Abney a reconnu que la composition spectrale du cratère est invariable quelle que soit la grandeur de l'arc et son intensité lumineuse totale. Cette observation tend à prouver que la température du cratère est invariable et qu'elle correspond au point de vaporisation du carbone. Cette remarque montre en même temps la raison pour laquelle toute matière étrangère contenue dans le charbon diminue la puissance lumineuse du foyer. Le carbone est, en effet, le corps qui possède le point de volatilisation le plus élevé; tout autre corps simple doit diminuer la température du foyer, et, par suite, son éclat. Un corps composé est aussitôt dissocié dans l'arc et produit également un abaissement de température.

Le peu d'éclat de l'arc proprement dit, malgré la température

excessive de celui-ci, que M. Rosetti a estimée à 4 800° C, tient au faible pouvoir émissif des vapeurs.

La pratique a montré qu'il est avantageux de placer les charbons verticalement dans le prolongement l'un de l'autre, le charbon positif étant au dessus et pas trop rapproché du charbon négatif, auquel on donne un diamètre plus faible. Le cratère qui forme le foyer lumineux est ainsi mieux dégagé et peut envoyer ses rayons latéralement vers le sol, sans que l'ombre portée par le charbon négatif soit gênante. Dans le but d'éclairer des objets situés au dessus du foyer, on dispose parfois le charbon positif en dessous du négatif. L'arc a alors une tendance à voyager autour des crayons.

708. — **Résistance apparente de l'arc voltaïque.** — On peut produire un arc voltaïque court, de 0,5 mm environ, entre deux crayons de charbon, avec une différence de potentiel de 25 à 30 volts. Mais un tel écartement est difficile à maintenir. A la pointe négative, il se produit un champignon qui tend à souder les charbons et qui, par la rupture de son pédicule, occasionne un brusque écartement des crayons. Un arc semblable, à faible différence de potentiel, exige des charbons très denses et très durs. L'écartement des longs arcs ordinairement adoptés dépasse 2 mm et la différence de potentiel des charbons varie de 40 à 45 volts. Dans un tel foyer, il ne se forme pas de champignon, parce que la pointe négative est brûlée par l'oxygène de l'air, et la taille des crayons est beaucoup plus régulière. Un fait singulier consiste en ce qu'il est difficile de maintenir un arc sous les tensions intermédiaires entre 30 et 40 volts. Entre ces limites, les charbons sifflent et la combustion est irrégulière.

A mesure qu'on écarte les charbons pour allonger l'arc, la différence de potentiel doit être accrue pour vaincre la résistance de la masse gazeuse. Si l'on cesse de faire croître la tension avec l'écartement des crayons, le foyer s'éteint. On peut toutefois interrompre le courant pendant un dixième de seconde sans crainte d'extinction, l'atmosphère gazeuse persistant entre les crayons pendant cet intervalle de temps. Cette remarque montre la possibilité d'alimenter l'arc par des courants alternatifs, dont l'intensité passe périodiquement par une valeur nulle. On peut courber l'arc et l'éteindre par un courant d'air ou en lui présentant un aimant, dont les lignes de force réagissent suivant la règle d'ampère.

La différence de potentiel $e$, nécessaire pour maintenir un foyer à arc alimenté par un courant continu, peut être représentée par une fonction linéaire de la longueur de l'arc. En supposant celle-ci égale à $l$, on a

$$e = a + bl.$$

Le second terme du binome représente la perte de tension résultant de la résistance propre de l'atmosphère incandescente. Le premier terme $a$ a donné lieu à des interprétations diverses. Edlung et quelques autres physiciens y voient la représentation d'une force contre-électromotrice dont le foyer serait le siège. Mais on n'a fourni jusqu'à présent aucune preuve directe et probante de l'existence de celle-ci et il est difficile d'expliquer l'origine d'une différence de potentiel semblable, à moins qu'on n'admette que la force électromotrice de contact entre les crayons et l'arc soit relativement considérable. La plupart des électriciens sont d'avis que le terme constant exprime une chute de potentiel simplement due à la résistance au passage entre l'arc et les extrémités des crayons. Ce terme est variable avec la section de l'arc; il se décompose en deux parties, l'une exprimant la chute de potentiel près du crayon positif, l'autre la chute de potentiel près du crayon négatif.

Avec des charbons de 12 mm de diamètre et un arc variant de 6 à 16 mm de longueur, M. Uppenborn a obtenu 38 volts pour la valeur de $a$. Il a mesuré la chute de potentiel entre les crayons et l'arc à l'aide d'un voltmètre et d'une baguette de charbon auxiliaire taillée en pointe et placée dans l'arc successivement près des deux charbons. Il a trouvé 32,5 volts au crayon positif et 5,5 volts au crayon négatif. Ce résultat montre que la majeure partie de la chaleur voltaïque se développe dans le cratère et explique l'éclat particulier de cette partie du foyer.

M. S. Thompson attribue à la chaleur latente de vaporisation du carbone la chute de potentiel observée aux crayons, cette chute correspondant, d'après lui, au travail absorbé par le passage de l'état solide à l'état gazeux.

Dans l'incertitude où l'on se trouve quant à l'existence d'une force contre-électromotrice dans le foyer, on a désigné sous le nom de ***résistance apparente*** de ce dernier le rapport entre la différence de potentiel aux extrémités des charbons et l'intensité du courant.

Au point de vue de l'effet lumineux, il est avantageux d'employer des charbons aussi minces que possible. M. Schreihage a montré qu'à intensité de courant et à différence de potentiel égales la somme de lumière fournie par le foyer est sensiblement en raison inverse du diamètre des crayons, pour des crayons variant de 7 à 18 mm. Mais, dans le but de réduire l'usure et l'échauffement par le courant, il faut faire croître le diamètre des charbons avec l'intensité du courant.

M. Vogel a reconnu que l'économie de l'éclairage par arc voltaïque augmente, jusqu'à une certaine limite, avec la longueur de ce dernier. Au delà d'une longueur donnée, le cratère disparait, l'arc voyage autour du crayon positif et la lumière devient instable.

Pour les courants variant de 4 à 25 ampères, on fait usage de charbons positifs ayant de 8 à 18 mm de diamètre. Dans le cas de foyers très puissants, on emploie des faisceaux de crayons ou des charbons cannelés. Le charbon négatif a toujours une section inférieure à celle du charbon positif.

Lorsque les charbons sont très minces et très purs, il est possible d'obtenir des arcs de 1 à 2 ampères et 40 à 45 volts parfaitement stables, mais les mécanismes régulateurs de ces foyers deviennent très délicats, ce qui les fait écarter.

Les arcs puissants, de 100 ampères par exemple, sont également difficiles à maintenir et occasionnent, lorsqu'ils se dérèglent, un bruit assourdissant.

Les arcs les plus fréquents mesurent de 4,5 à 5 mm de longueur, les charbons ayant respectivement 12 mm et 8 mm. L'intensité du courant est voisine de 8 ampères et la différence de potentiel de 42 volts. L'usure totale des crayons est alors de 4 à 5 cm à l'heure.

709. — **Emploi des courants alternatifs.** — Lorsque l'arc est alimenté par des courants alternatifs, les deux crayons sont le siège de phénomènes semblables et se taillent en pointe tous deux. Le charbon inférieur s'use légèrement moins que le charbon supérieur, à cause du courant d'air ascensionnel qui tend à consumer latéralement ce dernier. Les pointes des deux charbons sont également lumineuses, ce qui amène la même répartition de lumière vers le haut que vers le bas, contrairement à ce qui a lieu avec les courants continus. Comme, en général, les objets à éclairer sont

disposés sous le foyer, on est obligé de placer des réflecteurs au dessus des arcs à courants alternatifs. Ceux-ci n'exigent pas une différence de potentiel aussi forte que celle des arcs à courant continu. Tandis que ces derniers demandent en moyenne 40 à 45 volts, les premiers n'absorbent que 32 à 35 volts. Par contre, à intensité lumineuse égale, le courant doit avoir une intensité efficace plus grande avec les arcs alternatifs. Les variations des courants alternatifs font vibrer les crayons et déterminent dans la lampe un bourdonnement assez désagréable dans les appartements. On arrive à diminuer le bruit par l'emploi de globes fermés.

710. — **Fabrication des charbons artificiels.** — Les charbons employés dans les lampes à arc doivent être compacts et homogènes. Dans ce but, on a suivi pendant longtemps le procédé de fabrication employé par Carré et Gaudouin, et qui consiste à agglomérer du poussier de charbon de choix, graphite, coke de pétrole, de goudron, etc., au moyen de sirop de sucre, de gomme ou de tout autre agglutinant susceptible de laisser un dépôt charbonneux sous l'action de la chaleur en vase clos. La pâte est malaxée avec soin, puis passée à la filière sous une pression considérable, de manière à obtenir un cylindre de diamètre convenable, qu'on découpe en crayons de 25 à 40 cm. Parfois les baguettes de charbon sont formées en emprisonnant la pâte dans des moules de forme cylindrique sous une pression considérable. Ce procédé fournit des produits plus denses, mais de section moins régulière.

Les baguettes de charbon sont desséchées avec soin à l'étuve sous une chaleur progressive, puis soumises à une carbonisation aussi complète que possible, afin d'éliminer de la pâte tous les produits hydrocarburés. Les charbons retirés du four sont poreux. Pour les rendre compacts, on les plonge dans une dissolution concentrée et chauffée de sirop de sucre. La liqueur pénètre lentement dans la matière. Lorsque l'imbibition des charbons est suffisante, on les sèche, puis on les carbonise de nouveau en élevant graduellement la température pour ne pas déformer les cylindres. Cette opération est répétée jusqu'à ce que les crayons aient atteint une compacité suffisante.

Actuellement, les fabricants de crayons sont arrivés à d'excellents produits après une seule cuisson, ce qui permet de supprimer l'opération longue et coûteuse du nourrissage. La matière servant

à composer la pâte est un mélange de graphite et de coke de cornue, réduit en poudre impalpable et aggloméré par des goudrons débarassés de toute matière alcaline ou terreuse. Les cokes provenant de la distillation des huiles minérales ou de leurs résidus constituent un produit particulièrement recherché pour cette fabrication. La pulvérisation se fait à l'aide de cylindres en acier ou de meules; elle est poussée aussi loin que possible et la poudre est passée au tamis. Le mélange avec le goudron s'opère au moyen de malaxeurs et de meules valseuses. Ces diverses opérations sont destinées à donner une pâte fine et homogène. L'air est expulsé de cette pâte par un pilon mécanique qui bat la matière et la transforme en un bloc cylindrique. Celui-ci est porté dans un cylindre dont le fond présente un orifice étroit et dont le piston est soumis à une pression hydraulique de 200 à 300 atmosphères. La pâte est ainsi tréfilée, en deux ou trois passes, sous forme de crayons qu'on entasse dans des creusets réfractaires. On a soin de chauffer les cylindres par une enveloppe de vapeur, ce qui ramollit le goudron et permet de réduire la proportion de ce dernier dans le mélange. La cuisson est effectuée dans un four à gazogène comprenant des chambres séparées dans lesquelles on peut faire varier la température par degrés, pour volatiliser lentement les hydrocarbures et permettre à la matière de conserver sa compacité lors du refroidissement. L'opération dure de 7 à 8 jours.

Pour vérifier la qualité des charbons, on a coutume de les disposer dans un régulateur sensible et d'enregistrer les variations de tension de l'arc à l'aide d'un voltmètre.

Les crayons destinés à former le pôle positif de l'arc sont généralement pourvus d'une mèche ou âme en pâte de charbon séchée, et non cuite, de manière à conserver une légère proportion d'hydrocarbures. La volatilisation de ceux-ci augmente la conductibilité de l'atmosphère au centre de l'arc. Le peu de dureté de la mèche maintient le cratère dans l'axe du crayon positif.

Les crayons très minces sont recouverts d'un dépôt de cuivre dans le but d'augmenter leur conductibilité. Les crayons du commerce, de 11 à 15 millimètres de diamètre, ont une résistance variant de 0,45 à 0,6 ohm par mètre. Le charbon de cornue présente une résistance 5 à 20 fois plus grande.

**711. — Division des lampes à arc voltaïque.** — Les lampes à arc se divisent en deux catégories, d'après la manière dont les pointes des charbons sont maintenues à distance constante, malgré l'usure par transport et par combustion.

1° Les *lampes à régulateur*, dans lesquelles les charbons sont rapprochés, au fur et à mesure qu'ils se consument, par l'action d'un mécanisme spécial.

2° Les lampes à écartement fixe déterminé par une matière solide et isolante, maintenant les extrémités des charbons à une distance invariable. Les *bougies électriques*, dans lesquelles les charbons sont placés parallèlement et isolés l'un de l'autre, rentrent dans cette catégorie.

## RÉGULATEURS A ARC VOLTAÏQUE.

**712. — Conditions à réaliser.** — Les lampes à régulateur doivent satisfaire aux conditions suivantes.

1° Il faut que les charbons, d'abord au contact, s'écartent sous l'influence du courant à une distance déterminée et variable avec la puissance lumineuse à obtenir et l'intensité du courant de régime.

2° Lorsque les crayons s'usent, un mécanisme doit les rapprocher de manière à rétablir l'écartement normal; si l'arc se rompt, les deux charbons sont ramenés au contact.

Afin de réaliser ces conditions, le régulateur comprend nécessairement :

1° Une force motrice tendant à ramener les charbons l'un vers l'autre. Le plus souvent, l'effort moteur est le poids du charbon supérieur et de son support. Parfois, on a recours à des ressorts, voire même à de petits électromoteurs.

2° Un mécanisme de séparation des charbons établissant l'écartement normal lorsqu'on fait passer le courant. Ce mécanisme se réduit généralement à un électro-aimant traversé par le courant et qui attire un noyau ou une armature fixée à l'un des charbons, de manière à provoquer la séparation.

3° Un mécanisme de rappel de l'usure des crayons, qui se confond parfois avec le précédent et qui, d'autres fois, en est dis-

tinct. Si, par exemple, les charbons sont maintenus à une différence de potentiel constante, l'allongement de l'arc résultant de l'usure diminue l'intensité du courant et, par suite, l'action, sur son noyau ou son armature, de l'électro-aimant commandant le mécanisme de rappel, ce qui permet aux crayons de se rapprocher.

Il est désirable que l'un des deux mécanismes mentionnés ci-dessus soit à même d'écarter les charbons à une distance supérieure à la longueur normale, lorsque la résistance de l'arc vient à diminuer, par exemple lorsqu'un jet de gaz résulte de la décomposition d'hydrocarbures contenus dans les charbons. Ce réglage combat les variations d'éclat qui se produisent à cette occasion.

Les lampes à régulateur contiennent, en outre, certaines dispositions auxiliaires. Les mouvements des pièces mobiles sont souvent adoucis par des amortisseurs ou des freins. Lorsque de nombreuses lampes sont alimentées en série, un mécanisme particulier met les lampes en court-circuit, quand il s'y produit une extinction amenée, par exemple, par une rupture des crayons. Enfin, dans certaines lampes destinées à brûler, sans interruption, pendant un laps de temps considérable, tel que 16 ou 20 heures, on évite l'emploi de charbons d'une longueur excessive en combinant deux paires de crayons, dont l'une est maintenue écartée jusqu'à ce que l'autre soit consumée. On arrive au même résultat par l'emploi de deux charbons plats de grande largeur placés, dans un même plan, dans le prolongement l'un de l'autre. L'arc jaillit entre les bords des charbons et se déplace de manière à réunir les parties les plus voisines de ceux-ci. On fait également usage de crayons multiples, formant des faisceaux plats et produisant un effet analogue au précédent. Ces combinaisons procurent une durée de fonctionnement très considérable, mais elles n'assurent pas la même fixité à la lumière que le dispositif ordinaire.

Pour simplifier le mécanisme, on supporte fréquemment le charbon inférieur d'une manière invariable. Le crayon supérieur se déplace seul au fur et à mesure de l'usure des charbons. Mais, dans ce système, l'arc descend progressivement et il n'est pas possible de faire usage de réflecteurs et de projecteurs. Ceux-ci exigent que le point lumineux reste fixe et que les deux crayons soient mobiles, leurs courses étant réglées d'après leurs usures respectives.

Nous exposerons d'après M. Pasqualini (1) le principe des organes de rappel de l'usure des charbons les plus employés.

La lumière émise par l'arc voltaïque dépend de sa longueur $l$, de l'intensité du courant $i$, de la différence de potentiel $e$ des extrémités des crayons et du diamètre de ceux-ci. Or, on a vu que, pour des charbons donnés et un courant d'intensité déterminée, on a la relation

$$e = a + b\,l,$$

où $a$ et $b$ sont des constantes.

Il en résulte qu'avec des charbons d'un certain diamètre, l'intensité lumineuse est une simple fonction de $e$ et de $i$. Les régulateurs peuvent avoir pour objet de maintenir constante une de ces deux quantités ou une fonction de celles-ci.

713. — **Régulateurs à courant constant.** — Ainsi les premiers régulateurs employés étaient à courant constant. Le schéma, fig. 467, montre le principe d'un tel appareil dans lequel le charbon inférieur est supposé fixe. Le poids du charbon supérieur et de son

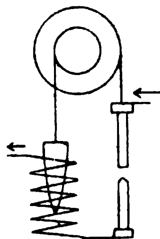


Fig. 467.

porte-charbon sert de moteur pour rapprocher les crayons. Ce poids est partiellement équilibré par un noyau susceptible d'être attiré par un solénoïde en série avec les crayons. Les efforts sont transmis par des cordelettes à des poulies figurées au croquis.

Au moment de l'envoi du courant, le noyau est attiré et les

(1) *La Lumière Électrique*, t. 34, page 312.

charbons s'écartent; l'équilibre est obtenu lorsque l'attraction magnétique compense la différence $p$ entre le poids moteur et celui du noyau.

Le noyau est tellement proportionné que, sous un courant constant et dans les limites de course prévues, l'attraction est invariable, quelle que soit la position du noyau dans le solénoïde. On a vu, au § 154, que cette condition est réalisée dans des limites assez étendues avec des noyaux à section décroissante. Dans cette hypothèse, en appelant $n$ le nombre de spires et $k$ une constante, la condition d'équilibre est

$$k\,ni = p\,;$$

d'où l'équation du régulateur

$$i = \mathrm{C^{te}}.$$

Afin que la force attractive reste bien constante, on est amené à limiter autant que possible la course du noyau, en employant des poulies de diamètres différents, comme l'indique la figure.

Dans certains appareils, l'électro-aimant régulateur n'agit pas directement sur le porte-charbon supérieur. Celui-ci est sollicité par un mécanisme, dont le fonctionnement est arrêté par l'armature de l'électro-aimant. Dans ce système, qu'on peut appeler *à déclic*, par opposition au système *à action directe*, l'électro-aimant a pour effet de vaincre la résistance d'un ressort qui s'oppose au mouvement de l'armature. En appelant $f$ l'effort résistant du ressort, l'équation du régulateur devient

$$k\,ni = f.$$

Le système à déclic n'a pas une action continue, comme le système à action directe. Il ne fonctionne que lorsque le courant dépasse des limites déterminées.

714. — **Régulateurs à potentiel constant.** — Dans une seconde classe d'appareils, dont une disposition théorique est indiquée dans la fig. 468, le rappel de l'usure est effectué par un solénoïde monté en dérivation par rapport aux crayons, le poids du noyau étant ici plus grand que le poids du porte-charbon supérieur.

Un mécanisme spécial, non indiqué dans le dessin, a pour effet de maintenir les charbons au contact lorsque le courant est nul. Quand le courant passe, l'écart normal est déterminé par l'équilibre entre le poids $p$ et l'attraction magnétique du solénoïde.

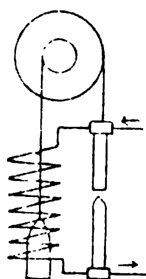


Fig. 468.

En appelant $n'$ le nombre de spires du solénoïde, $r'$ sa résistance et $i'$ l'intensité du courant qui le traverse, on a

$$k' n' i' = p.$$

Mais comme

$$i' = \frac{e}{r'},$$

$$k' n' \frac{e}{r'} = p.$$

La seule variable de l'équation précédente étant $e$, la formule du régulateur est

$$e = C^{te},$$

d'où le nom de *régulateurs à potentiel constant* donné à cette classe d'appareils.

Généralement dans ces régulateurs, le charbon supérieur est retenu par un déclic commandé par le solénoïde, et l'écartement des crayons est produit par un électro-aimant en série qui déplace le charbon inférieur lors de la fermeture du circuit. Lorsque l'arc s'allonge, il arrive un moment où le déplacement du noyau du solénoïde est suffisant pour agir sur le déclic et le charbon supérieur descend par son poids, jusqu'à ce que l'arc normal soit rétabli.

715. — **Régulateurs différentiels.** — Dans une troisième classe d'appareils, les deux mécanismes précédents sont combinés. Un double noyau équilibre exactement le poids du crayon supérieur et de son support et pénètre à la fois dans deux solénoïdes, dont

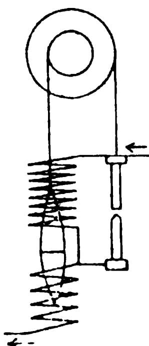


Fig. 469.

l'un est en dérivation et l'autre en série par rapport aux crayons. Au moment de la fermeture du circuit, le courant principal est très intense, l'action du solénoïde inférieur prédomine, les crayons s'écartent et l'arc jaillit. L'écart normal est réglé par la condition

$$k\,n\,(i + i') = k'\,n'\,i',$$

d'où

$$\frac{e}{i} = \frac{k\,n\,r'}{k'\,n' - k\,n} = C^{te}.$$

Dans ce système, le rapport de la différence de potentiel à l'intensité du courant, c'est à dire la résistance apparente de l'arc, reste constant. Ces régulateurs sont dits *différentiels* ou à *résistance constante*. Ils sont les plus sensibles aux variations des facteurs électriques $e$, $i$, par le fait même qu'ils obéissent à une action différentielle. Cependant beaucoup de constructeurs préfèrent les lampes en dérivation, qui sont moins influencées par une baisse momentanée de tension.

Ces combinaisons s'appliquent aux courants alternatifs, si l'on a soin de donner aux électro-aimants des noyaux lamellaires ou filiformes destinés à diminuer les courants de Foucault.

**716. — Alimentation des régulateurs. Résistance additionnelle.** — Examinons le cas où les régulateurs sont alimentés en dérivation. On est alors obligé d'ajouter en série avec chaque lampe une *résistance additionnelle*, car, les crayons ayant une résistance faible, le générateur électrique serait mis en court-circuit au moment de l'allumage et chaque fois que les charbons viennent au contact, ce qui occasionnerait des chocs au moteur et des variations dans les autres lampes placées en dérivation. En outre, comme la résistance de l'arc diminue à mesure que le courant augmente, celui-ci tend à croître de plus en plus, et il n'existe pas de régulateur susceptible d'agir assez vite pour empêcher l'établissement d'un courant d'intensité exagérée. La fonction de la résistance additionnelle est de réduire la différence de potentiel aux charbons en provoquant une chute de tension croissant avec l'intensité du courant. Il est d'ailleurs évident qu'à défaut de cette résistance, un régulateur à potentiel constant ne pourrait fonctionner dans une distribution à tension invariable, car le mécanisme de rappel de l'usure des charbons, étant basé sur les variations mêmes de la différence de potentiel, serait sans action.

Les résistances additionnelles se composent d'hélices en métal, disposées à l'air libre et soutenues par des isolateurs dans des chassis métalliques. On utilise parfois des boudins de fil de fer mince, enroulés sur des tubes à gaz avec interposition de mica. Ce fil s'échauffe fortement lorsque les charbons de la lampe viennent accidentellement en contact et la résistance additionnelle augmente avec la température, c'est à dire avec l'intensité du courant, contrairement à la résistance de l'arc, qui décroît dans ces conditions. Il y a là une compensation qui vient en aide à l'action du mécanisme pour régulariser le fonctionnement de la lampe.

D'une manière générale, plus la résistance additionnelle est grande, moins le mécanisme du régulateur exige de sensibilité pour maintenir le foyer constant.

M. De Puydt calcule de la manière suivante la résistance additionnelle minima pour un foyer intercalé dans une distribution à potentiel constant.

Comme le mécanisme d'un régulateur ne possède pas une sensibilité indéfinie, il est indispensable que l'arc puisse se maintenir lors d'une variation faible du courant d'alimentation. Or, à écar-

tement constant, la résistance apparente d'un arc augmente plus vite que le courant ne diminue et inversement; en sorte que tout affaiblissement du courant entraîne une augmentation de la différence de potentiel aux charbons et réciproquement. Ainsi, dans un arc de 4,5 mm, fonctionnant avec un courant de 20 ampères et une différence de potentiel aux crayons de 46 volts, une diminution de courant de 2 ampères amène un accroissement de tension aux charbons de 1 volt. Il est donc nécessaire que la chute de tension dans la résistance additionnelle diminue d'une quantité équivalente pour donner à l'arc la différence de potentiel qu'il exige.

En appelant $r$ la résistance additionnelle, on a la condition

$$2\,r = 1 \qquad \text{d'où} \qquad r = \tfrac{1}{2} \text{ ohm.}$$

La chute de tension totale avec le courant normal de 20 ampères est alors de 10 volts.

Avec les courants alternatifs, on fait usage de bobines à réaction, § 446, qui entraînent une perte d'énergie moindre que les résistances sans self-induction.

On compte généralement qu'une différence de potentiel de 65 volts est nécessaire pour alimenter des lampes disposées en dérivation et absorbant 8 à 10 ampères. La chute de tension moyenne entre les crayons est de 42 volts ; les crayons ayant 25 à 30 cm de longueur absorbent 3 volts ; l'électro-aimant disposé éventuellement en série présente une résistance de 0,05 à 0,2 ohm et dépense, avec la résistance additionnelle, la dizaine de volts restante. Les électro-aimants en dérivation reçoivent une résistance variant de 200 à 500 ohms.

Il faut remarquer qu'une pile ou une dynamo de résistance suffisante peut alimenter un arc unique, la résistance du générateur même faisant fonction de résistance additionnelle.

Avec les courants alternatifs, la différence de potentiel aux crayons est réduite, et l'emploi des bobines à réaction permet de restreindre la tension de distribution à 45 ou 50 volts.

On diminue la perte occasionnée par les résistances additionnelles en mettant plusieurs arcs en série sur une distribution à tension constante. Avec une distribution à 110 volts, on alimente aisément deux arcs en série en employant une résistance additionnelle réduite.

Lorsque le nombre des lampes dépasse 5 ou 6, on supprime la résistance, les lampes se régularisant mutuellement.

Les régulateurs à courant constant ne peuvent toutefois être associés en série dans une distribution à potentiel constant, car il est alors impossible de maintenir les arcs au même écartement dans les divers appareils. Le courant, qui règle les foyers, conserve, en effet, une valeur invariable lorsque la résistance totale des arcs est invariable. Or, cette condition peut être satisfaite avec des arcs inégaux, pourvu que l'excès de résistance des uns compense le défaut de résistance des autres. Cette raison a fait abandonner à peu près complètement les régulateurs à courant constant.

En vue d'économiser les conducteurs, on dispose souvent les arcs en série au nombre de 30 à 50, en les alimentant par un générateur à courant invariable. Il est évident que, dans un cas semblable, il faut recourir aux systèmes de régulateurs à potentiel constant ou à résistance invariable.

Les systèmes de régulateurs sont excessivement nombreux. Nous ne décrirons que quelques types, à titre d'application des principes précédents.

717. — **Régulateur Jaspar.** — Le régulateur Jaspar appartient au type des régulateurs à courant constant. Les deux porte-charbons *t* et *t'* se déplacent dans des glissières et leurs mouvements sont rendus solidaires grâce à des cordelettes qui sont fixées, d'une part, aux extrémités de ces porte-charbons et, de l'autre, à deux poulies R, calées sur le même axe. Les diamètres des deux poulies sont dans le rapport de 2 à 1, de sorte que, lorsque l'axe tourne, le charbon supérieur se déplace d'une longueur double de celle parcourue par le charbon inférieur. De cette manière, on parvient à rendre fixe le foyer lumineux lorsqu'il est alimenté par un courant continu.

Le poids du porte-charbon supérieur détermine le rapprochement des charbons. Ce poids est partiellement équilibré par celui du porte-charbon inférieur et d'un contre-poids P, relié à l'axe des poulies par une cordelette et mobile sur son bras de levier; on règle l'effort moteur d'après l'intensité du courant. Celui-ci arrive au charbon supérieur par la glissière en contact avec le porte-charbon; il descend par le crayon inférieur dans une cataracte à

mercure D, qui a pour effet d'adoucir les mouvements du mécanisme; enfin, il sort de l'appareil après avoir traversé un solénoïde à gros fil S. Le porte-charbon $t'$ est terminé par un cylindre de fer plongeant en partie dans le solénoïde. Lorsque le courant est établi en réunissant la lampe et sa résistance additionnelle à un générateur à différence de potentiel constante, le cylindre est attiré et l'arc jaillit entre les charbons ; à mesure que ceux-ci s'écartent,

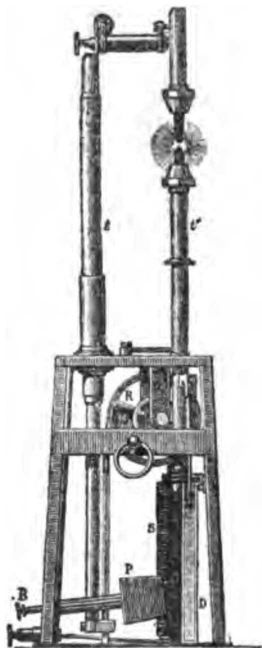


Fig. 470.

l'intensité du courant et, par conséquent, l'attraction qu'exerce le solénoïde sur le porte-charbon inférieur diminuent ; il en est ainsi jusqu'au moment où cette attraction fait équilibre au poids moteur. Lorsque l'arc s'allonge par suite de l'usure des charbons, le poids moteur rapproche ces derniers jusqu'à ce que l'intensité du courant ait repris sa valeur de régime.

L'attraction du noyau par le solénoïde varie avec sa position dans celui-ci. On pourrait régulariser cette action par l'adoption de noyaux coniques, § 154. D'un autre côté, le charbon supérieur

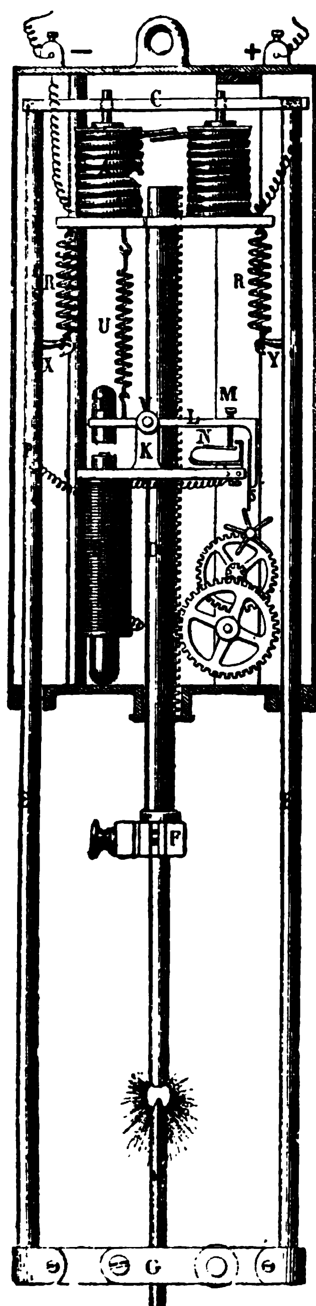



Fig. 471.

se consume plus rapidement que l'autre, en sorte que la force motrice varie légèrement. Afin de corriger ces écarts des deux forces antagonistes, M. Jaspar a placé, excentriquement par rapport à l'axe des poulies, un contrepoids *r* dont le bras de levier varie avec la position des poulies, de manière à compenser à chaque instant les variations susdites. Le haut du porte-charbon supérieur est muni de genouillères mobiles qui permettent de disposer les crayons exactement l'un dans le prolongement de l'autre. Avec des charbons bien droits, tenus dans des griffes solides et convenablement dressées, cette disposition est inutile. On a vu, au § 716, la raison pour laquelle les régulateurs de ce système sont abandonnés.

718. — **Régulateur Gramme.** — Cette lampe appartient à la classe des régulateurs à potentiel constant. Le crayon inférieur, porté par les tringles E E, est sollicité, d'une part, par les ressorts R R, de l'autre, par un électro-aimant en série A A, dans lequel plongent des noyaux fixés à une traverse C. Cet électro-aimant provoque l'écartement normal des charbons au moment de la fermeture du circuit de la lampe. L'arc produit, le porte-charbon inférieur reste fixe. Le mécanisme de rappel de l'usure est mû par le poids de la crémaillère D, agissant sur une série de rouages dont le dernier est une roue étoilée, arrêtée par un encliquetage S. Le doigt de l'encliquetage est suspendu

au levier L, sur lequel est fixée l'armature I de l'électro-aimant en dérivation B. Lorsque l'armature rappelée par un ressort U s'abaisse sous l'effet d'un accroissement de différence de potentiel dû à l'usure des charbons, le rouage est débrayé et le porte-charbon supérieur descend.

Pour éviter un rapprochement trop brusque et trop considérable, on a recours à l'artifice suivant. Le doigt d'encliquetage, en se retirant pour dégager la roue étoilée, coupe le circuit de la bobine en dérivation au contact de la vis M et de la lame N. Il s'ensuit que l'armature I se relève immédiatement et que la roue étoilée ne peut tourner que d'une dent, ce qui correspond à un déplacement très faible du charbon supérieur. Mais le relèvement de l'armature rétablit le courant comme dans les sonneries trembleuses et les mêmes actions se répètent tant que l'arc n'a pas repris sa longueur normale. Par ces dispositions, le mouvement de réglage se produit à des intervalles réguliers et par quantités insensibles, conditions indipensables pour obtenir une lumière fixe.

**719. — Lampe Brush.** — La lampe Brush appartient à la classe des régulateurs différentiels. Le porte-charbon inférieur est fixe. Le porte-charbon supérieur mobile tend à descendre par son

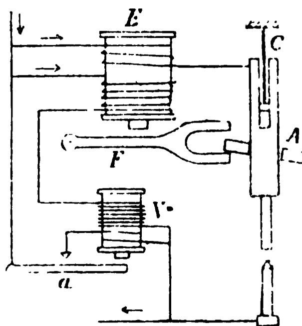



Fig. 472.

poids contre le précédent. Il est engagé dans une bague A, saisie latéralement par une fourchette F portée par l'armature de l'électro-aimant régulateur E ; celui-ci comprend une bobine à gros fil en série et une bobine à fil fin en dérivation, agissant en sens contraire

de la première. Quand le courant est envoyé dans la lampe, l'action prépondérante de l'enroulement à gros fil attire l'armature vers le haut. La griffe F soulève obliquement la bague qui coince le porte-charbon supérieur et l'entraîne dans son mouvement ascensionnel. Le déplacement a lieu jusqu'à ce que l'action croissante du courant dérivé fasse équilibre à celle du courant principal, lequel diminue à mesure que les charbons s'éloignent; ceux-ci atteignent ainsi l'écartement normal.

Lorsqu'ils s'usent, l'armature retombe progressivement par l'effet de son poids. La bague se place horizontalement et le porte-charbon supérieur descend avec une vitesse modérée par une cataracte à glycérine C. Mais, par le fait, le courant principal s'accroît, la fourchette est soulevée et la bague arrête de nouveau le charbon supérieur.

Quand la lampe doit rester allumée pendant plus de 8 heures, elle est pourvue de deux paires de charbons. L'armature porte deux fourchettes à des hauteurs différentes ; par suite, lorsqu'on lance le courant, l'une des bagues est soulevée avant l'autre, de sorte que l'une des paires de charbons s'écarte davantage que les crayons voisins. L'arc jaillit entre les deux charbons les plus rapprochés et persiste jusqu'à ce qu'ils soient arrêtés par suite d'une usure complète. Le crayon supérieur de la paire de charbons voisine peut alors descendre et l'arc se produit entre les nouveaux charbons.

La lampe, particulièrement destinée à fonctionner à l'aide du système de distribution en série, est pourvue d'un veilleur ou dispositif destiné à produire la mise en court-circuit lorsqu'un accident, tel que le bris des charbons, se produit dans l'appareil. Dans ce but, un électro-aimant V est pourvu de deux enroulements dont les actions s'ajoutent sur une armature. Une bobine à fil fin est placée à la suite de la bobine dérivée de l'électro-aimant E. Un enroulement à gros fil aboutit au buttoir de l'armature et peut mettre la lampe en court-circuit lorsque l'armature est attirée contre ce buttoir de contact. Quand la lampe fonctionne normalement, le courant dérivé, qui passe dans le fil fin de l'électro-aimant V, est trop faible pour provoquer l'attraction de l'armature. Mais si l'arc est interrompu, le courant augmente et l'armature est soulevée. Un courant direct passe alors dans le gros fil, et la lampe

est mise en court-circuit. Lorsque le contact des charbons se rétablit, le courant diminue assez dans le gros fil de l'électro-aimant V pour que l'armature retombe et permette à l'électro-aimant E d'entrer en action pour rétablir l'arc.

720. — **Lampe différentielle Pieper.** — La lampe Pieper est représentée dans les fig. 473 et 474. Les deux charbons se déplacent de manière à obtenir un foyer lumineux immobile. Ils sont fixés à des noyaux de fer latéraux qui soutiennent les porte-charbons et sont supportés par une corde enroulée autour d'une poulie.

Un électro-aimant différentiel porte deux épanouissements polaires en équerres, traversés par les noyaux mobiles qui complètent le circuit magnétique. Lorsque les ampères-tours des deux enroulements agissant en sens inverses sont égaux, le champ développé par l'électro-aimant est nul. Suivant que les ampères-tours en série ou les ampères-tours en dérivation prédominent, il se produit un champ dont les lignes de force vont de haut en bas ou de bas en haut dans les noyaux latéraux.

Les noyaux sont munis eux-mêmes d'enroulements, cachés dans la fig. 473 par des gaînes métalliques et qui sont, par moitiés, dextrorsum et sinistrorsum de manière à produire des pôles conséquents, de noms contraires, au milieu des noyaux. L'enroulement de l'un des noyaux est parcouru par le courant principal, celui de l'autre par le courant dérivé. La réaction des pôles de l'électro-aimant central sur les pôles conséquents tend à faire tourner la poulie dans un sens lorsque le courant principal a une action prépondérante, et en sens inverse dans le cas contraire. Afin de limiter le mouvement rétrograde, qui pourrait éteindre le foyer s'il dépassait une certaine mesure, un petit frein excentrique est engagé sur la poulie et serre contre celle-ci pendant le mouvement d'écartement des charbons. Les actions électromagnétiques produisent, d'ailleurs, dans les deux noyaux, des effets concourants comme c'est le cas dans les deux moitiés d'un induit annulaire. La course des noyaux correspond au déplacement, entre les pièces polaires, des pôles conséquents.

Au début du fonctionnement, si les charbons sont au contact, le courant principal exerce, dans l'électro-aimant central, une

action prédominante, et les noyaux se déplacent de manière à écarter les crayons. Le mouvement persiste jusqu'à ce que l'électro-aimant revienne à l'état neutre. Si, au contraire, les charbons

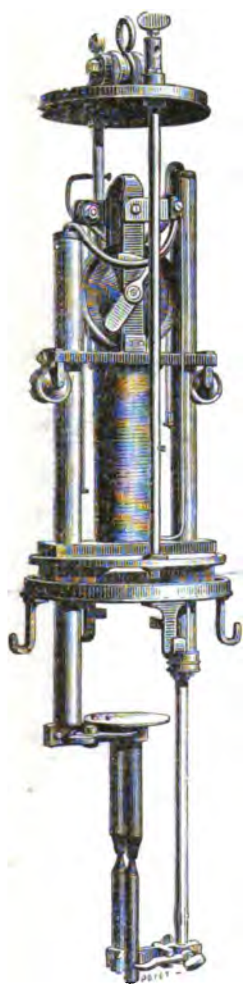


Fig. 473.

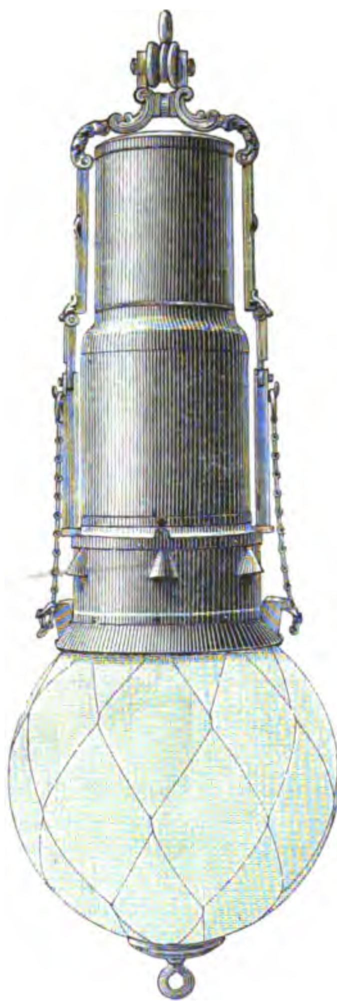


Fig. 474.

sont écartés au début, c'est le courant dérivé qui agit seul et déplace les noyaux jusqu'à amener les crayons en contact. Ce résultat

atteint, les charbons s'écartent graduellement sous l'effet du courant principal, jusqu'à l'obtention de l'arc normal.

Les noyaux et leurs enroulements sont garnis de tubes guides entre des galets. Comme on le voit, la lampe ne contient aucune pièce susceptible de se dérégler. Le réglage se fait à l'usine une fois pour toutes, avant même que les crayons soient disposés dans la lampe. Dans ce but, on ajuste les bobines enroulées sur le noyau central de manière que les pièces polaires n'exercent aucune attraction sur un morceau de fer lorsqu'on applique au système la différence de potentiel et le courant avec lesquels la lampe doit fonctionner.

La fig. 474, représentant la lampe garnie, montre le système d'attache du globe. Celui-ci est supporté par des chaînettes latérales qui s'accrochent vers le milieu de la boîte entourant le mécanisme. Pour renouveler les charbons, on décroche les deux chaînettes, qui glissent dans des œillets fixés à la boîte de la lampe jusqu'à ce que les anneaux qui les terminent soient arrêtés à ces œillets. Les porte-crayons sont alors à découvert. La lampe est fixée dans sa boîte par l'intermédiaire de plateaux en verre, de sorte que les pièces métalliques extérieures sont isolées du circuit.

## LAMPES A ARC SANS MÉCANISME.

721. — **Bougies Jablochkoff.** — Dans ces lampes, les charbons, recouverts d'un dépôt de cuivre qui augmente leur conductibilité, sont disposés parallèlement à 3 millimètres de distance et isolés par une cloison formée de plâtre et de baryte (fig. 475). Les charbons, dont le diamètre est d'environ 4 mm et la hauteur de 30 cm, sont munis inférieurement de gaines métalliques séparées par une pâte solide argileuse et se disposent entre des mâchoires B, C reliées aux conducteurs électriques, fig. 476. A la partie supérieure, les crayons sont réunis par un enduit charbonneux destiné à provoquer l'allumage. L'arc qui jaillit au sommet des charbons volatilise la séparation isolante au fur

et à mesure de l'usure des crayons et conserve une longueur constante, à la condition d'employer des courants alternatifs qui consument également les deux charbons.

On a donné à cette lampe le nom de *bougie électrique*. Les crayons de 30 cm ne brûlent que deux heures ; il est donc nécessaire de disposer plusieurs bougies dans un socle ou chandelier, tel que celui que représente la fig. 476, et de les allumer successivement à l'aide d'un commutateur.



Fig. 476.

La bougie Jablochkoff, grâce à la simplicité de son fonctionnement, a grandement favorisé le développement de l'éclairage électrique, parce qu'au début les régulateurs paraissaient compliqués et qu'on ignorait les moyens de les alimenter par groupes à l'aide d'une seule machine. Mais la bougie présente des inconvénients sérieux. Son rendement lumineux est moindre que celui des lampes à régulateurs, probablement par suite du refroidissement de l'arc amené par la volatilisation de l'isolant. Ce dernier provoque, en outre, des changements dans la coloration de la lumière et des vacillations, par suite des impuretés qu'il contient. La nécessité de recourir exclusivement aux courants alternatifs est une cause d'infériorité pour la lampe Jablochkoff, dont les charbons spéciaux sont, en outre, plus coûteux que ceux des régulateurs.

Lorsqu'une bougie s'éteint, elle ne se rallume pas spontanément et il est nécessaire de diriger le courant dans une autre bougie. La même manœuvre doit être faite toutes les deux heures,

lorsqu'une bougie est usée. Des dispositifs ont été brevetés, entr'autres par M. Jablochkoff et M. Clariot, dans le but de provoquer automatiquement le rallumage et la commutation du courant, mais ces moyens ôtent à la lampe sa simplicité, qui constitue son principal avantage.

722. — **Lampe soleil.** — Dans cette lampe, inventée par MM. Clerc et Bureau, la chaleur dégagée par l'arc voltaïque est employée à porter à l'incandescence un bloc de calcaire représenté en perspective dans la fig. 477. Le fond du bloc est creusé en



Fig. 477.

cuvette et deux des faces latérales opposées sont percées de trous, dans lesquels pénètrent les extrémités des charbons poussés par des ressorts. L'un des crayons est creux et peut être traversé par une baguette de charbon qu'on pousse contre le crayon voisin, puis qu'on retire de façon à provoquer l'allumage de l'arc. Le fond de la cuvette est porté peu à peu à l'incandescence et transformé en chaux vive.

On remarquera que les pointes des charbons, qui constituent la partie la plus lumineuse d'une lampe à arc, sont dissimulées. L'éclat est dû presqu'entièrement à la chaux, dont la lumière chaude convient très bien pour certaines applications spéciales. La réserve de chaleur absorbée par la masse de chaux dissimule les variations de l'arc et donne à la lampe une grande fixité.

Les charbons, protégés par le bloc calcaire contre le courant d'air, s'usent beaucoup moins que dans les lampes ordinaires et peuvent être de qualité inférieure. Par contre, il faut remplacer le bloc chaque fois que la lampe a cessé de fonctionner, car la chaux se délite rapidement à l'air. Il convient d'alimenter la lampe soleil par des courants alternatifs qui produisent une usure symétrique des deux charbons et des parois de séparation.

Le rendement lumineux est inférieur à celui des régulateurs, par suite de l'occlusion des pointes des crayons et de l'ombre portée par le bloc qui projette toute la lumière d'un seul côté, ce qui oblige à placer les lampes très haut.

## LAMPES A INCANDESCENCE A L'AIR LIBRE.

**723.** — Ces lampes, étudiées par MM. Reynier, Werdermann et Pieper, comportent une baguette de charbon en contact avec un bloc métallique, le point de contact étant traversé par un courant énergique. La pointe du crayon est ainsi portée à l'incandescence et se volatilise. Le poids du crayon ou un contrepoids ramène les pièces en contact au fur et à mesure de l'usure du charbon.

Dans la lampe Pieper, la baguette est cannelée et porte sur deux disques de cuivre servant à l'entrée et à la sortie du courant.

La lumière de ces lampes est plus chaude que celle de l'arc et sa fixité est comparable à celle des meilleurs régulateurs. Ces lampes absorbent un courant intense et une faible différence de potentiel, 25 à 30 ampères et 6 à 8 volts. Cette circonstance est peu avantageuse au point de vue de l'utilisation des conducteurs, à moins qu'on n'emploie une distribution en série. Le rendement lumineux du système est intermédiaire entre celui des lampes à arc et celui des lampes à incandescence dans le vide : mais ces dernières ont l'avantage sur les lampes à incandescence à l'air libre d'être exemptes du renouvellement journalier des charbons.

# PHOTOMÉTRIE.

724. — **Principes de la photométrie.** — Si l'on suppose qu'une source lumineuse, réduite à un point, est située au centre d'une sphère creuse de rayon R, la *quantité de lumière* Q développée tombe uniformément sur la surface sphérique. La quantité de lumière reçue par unité de surface, appelée *éclairement* de la sphère, est

$$e = \frac{Q}{4\pi R^2}.$$

La quantité de lumière qui traverse un angle solide convergent vers le foyer et égal à l'unité est $\frac{Q}{4\pi}$. Cette valeur, que nous désignerons par I, est constante pour une source lumineuse punctiforme et s'appelle l'*intensité lumineuse* de la source.

Si le rayon de la sphère était R′, la quantité de lumière par unité de surface deviendrait

$$e' = \frac{Q}{4\pi R'^2} = \frac{I}{R'^2}$$

d'où

$$\frac{e}{e'} = \frac{R'^2}{R^2}.$$

L'éclairement est inversement proportionnel au carré du rayon de la sphère.

On reconnaît, dans ces notations, une analogie de forme avec les notations employées dans l'étude des forces centrales (voir Introduction). Cette analogie peut être d'un certain secours pour aider à retenir les définitions précédentes.

Si un faisceau lumineux, comparable à un flux de force, traverse un cône élémentaire divergent de la source, la quantité de lumière est constante en toute section du cône. L'éclairement d'une section normale au rayon à une distance $r$ est

$$e = \frac{I}{r^2}. \qquad (1)$$

L'éclairement d'une section oblique faisant un angle $\alpha$ avec la section normale (angle d'incidence) est

$$e' = \frac{I \cos\alpha}{r^2}. \qquad (2)$$

En appelant $d\sigma$ la surface de la section, la quantité totale de lumière qui frappe celle-ci est

$$dq = \frac{I \, d\sigma \cos\alpha}{r^2}. \qquad (3)$$

L'expression de la quantité totale de lumière qui frappe une section quelconque sera de la forme

$$q = I \int \frac{d\sigma \cos\alpha}{r^2}.$$

Les sources lumineuses usuelles ne sont pas punctiformes et l'on définit sous le nom d'*éclat* d'un foyer la quantité de lumière émise normalement par unité de surface. Ainsi, en désignant par $q'$ la quantité totale de lumière émise par une paroi lumineuse uniforme de surface $s$, l'éclat est

$$\varepsilon = \frac{q}{s}. \qquad (4)$$

Si l'on considère une paroi lumineuse sous une direction oblique, la quantité de lumière reçue est moindre que si le rayon était normal à la paroi. La lumière émise, par unité de surface d'une paroi, dans une direction faisant un angle $\beta$ avec la direction normale, est $\varepsilon \cos \beta$. C'est pourquoi un globe lumineux paraît uniformément éclairé, la quantité de lumière émise par chaque élément du globe étant la même que celle qui serait émise par la projection de l'élément normale au rayon visuel.

Un peu de réflexion montre qu'il n'existe aucune différence essentielle entre la notion d'éclat et celle d'éclairement. Dans les deux cas, on est en présence d'une quantité de lumière par unité de surface; on peut dire que l'éclairement est l'éclat d'un objet devenu lumineux par réflexion ou par transparence.

La lumière étant un phénomène essentiellement subjectif ne se mesure que par son impression sur la rétine. Les effets calorifiques et chimiques des rayons lumineux permettent de mesurer l'énergie

relative de ces rayons, mais non leur aptitude à l'éclairement des surfaces, qui constitue le but des sources lumineuses.

La photométrie a pour objet la détermination de l'intensité lumineuse d'un foyer, en fonction de celle d'un autre foyer pris pour étalon. L'œil juge très mal du rapport de deux éclats ou de deux éclairements. D'après la loi psychophysique de Fechner, l'intensité de la sensation croît non pas proportionnellement à l'excitation, mais au logarithme de celle-ci. Il en résulte qu'on ne peut espérer arriver à quelque exactitude dans les mesures qu'en ramenant l'opération à la constatation de l'égalité de deux éclairements. Le plus souvent, on éclaire deux écrans semblables, sous des incidences égales, par les deux sources à comparer et l'on modifie les distances de celles-ci de manière que les éclairements obtenus paraissent identiques. En vertu des relations précédentes, le rapport des intensités lumineuses des foyers est égal au carré du rapport des distances correspondantes.

Comme, en général, les distances des sources lumineuses aux écrans sont grandes relativement aux dimensions des foyers, on peut considérer les sources comme punctiformes, sauf lorsqu'elles sont couvertes de globes laiteux de grande surface.

L'expérience a montré que l'œil juge le mieux de l'égalité de deux éclairements lorsque ceux-ci sont de l'ordre de celui que donne la lumière diffuse du jour. Mais, même dans ces conditions, les personnes douées de la vue la meilleure peuvent commettre une erreur de 0,7 à 1 pour 100, lorsque les deux plages éclairées sont regardées avec le même œil. M. Nichols a montré que l'erreur varie souvent entre 5 et 8 pour 100, lorsque les plages sont séparées par une cloison et regardées, la première avec un œil, la seconde avec l'autre œil.

L'erreur personnelle a donc une influence notable et l'on n'atteint jamais, dans les mesures photométriques, une exactitude aussi grande que dans les mesures électriques.

Théoriquement, la comparaison des éclairements n'est possible que si les deux sources lumineuses émettent des rayons de même composition spectrale. Si, par exemple, l'une d'elles est plus riche en rayons rouges et l'autre en rayons bleus, les éclairements ne sont plus rigoureusement comparables, et la mesure devient

...iation personnelle, où les phénomènes de dalto-
...nt souvent à des résultats très différents suivant
...s. On peut, dans un cas semblable, faire exécuter
...éterminations par des observateurs différents et
...s moyennes. Un autre procédé consiste à décomposer
... faisceaux à l'aide du prisme et à comparer séparément les
... de même couleur, pris deux à deux; mais cette opération
...ait l'objet de la spectrophotométrie n'est pas appliquée par
... praticiens à cause de sa complexité.

MM. Nichols et Crova ont remarqué que l'égalité des éclairements moyens fournis par deux foyers hétérogènes correspond à l'égalité des éclairements réalisés par des rayons d'une longueur d'onde déterminée. M. Nichols a indiqué la longueur d'onde égale à 0,0006 mm ($\lambda = 600$). M. Crova a trouvé que cette longueur d'onde critique est 0,000582 mm ($\lambda = 582$). M. Crova a, en outre, indiqué un procédé propre à obtenir ce rayon à l'exclusion des autres. Il suffit d'interposer, entre l'œil et l'écran éclairé, une cuve en verre contenant une épaisseur de 5 mm d'une solution de 22,321 gr de perchlorure de fer et de 27,191 gr de chlorure de nickel cristalisé, dissous dans l'eau distillée de manière à former un volume de 100 cm³ à 15° C. La solution est saturée de chlore pour assurer la conservation du liquide. Ce procédé supprime la nécessité de photométrer chacun des rayons du spectre séparément, et il permet d'obtenir, sans hésitation, le rapport photométrique de deux lumières de teintes différentes.

Lorsque les colorations des lumières sont très différentes, il est possible de tourner la difficulté par un autre artifice. On trace, sur les écrans éclairés par les deux sources, une série de dessins de plus en plus petits et l'on fait varier les distances des foyers jusqu'à ce que l'œil perçoive avec la même netteté deux dessins d'égale grandeur sur les deux écrans.

725. — **Étalons photométriques.** — Les étalons photométriques sont nombreux; c'est dire qu'aucun d'eux ne possède les qualités nécessaires pour justifier son emploi exclusif.

En France, on a adopté la lampe Carcel employée avec des précautions minutieuses indiquées par Dumas et Regnault. La consommation d'huile normale est de 42 grammes à l'heure.

Lorsque la consommation ne varie que de 4 grammes au-dessus ou au-dessous de cette valeur, on admet que la puissance du foyer suit une progression correspondante.

En Angleterre et aux États-Unis, on se sert d'un étalon moins précis, mais beaucoup plus commode, la bougie de blanc de baleine (*standard candle*), de 6 à la livre anglaise. Les Allemands emploient la bougie de paraffine (*vereinskerze*), de 12 au kilogramme.

Une petite lampe à mèche, étudiée par M. von Hefner et brûlant de l'acétate d'amyle, donne une intensité voisine de celle d'une bougie.

La hauteur de flamme de cette lampe et de toutes les lampes analogues se détermine aisément à l'aide d'un appareil de M. Krüss. Une lunette, fermée d'un côté par une lentille achromatique et de l'autre par une échelle divisée, tracée sur un verre dépoli, est placée devant la flamme à observer, la lentille étant à égale distance de celle-ci et du fond en verre. L'image de la flamme s'inscrit sur l'échelle, ce qui permet d'en lire commodément la hauteur.

La hauteur de flamme prescrite est de 45 mm pour la bougie anglaise, de 50 mm pour la bougie allemande et de 40 mm pour la lampe Carcel et l'étalon Hefner.

A diverses reprises, on a proposé des lampes étalons à gaz. M. Giroud a employé en France le gaz d'éclairage brûlant, dans un bec de forme particulière, en quantité déterminée. M. Vernon Harcourt brûle un gaz spécial de composition mieux définie, obtenu par la distillation du penthane.

M. Violle a préconisé un étalon plus précis, adopté par le Congrès des Électriciens de 1881. L'étalon Violle correspond à la lumière émise par un centimètre carré de platine à la température de la solidification (1775°). Dans le but de réaliser cet étalon, on fond le platine dans un creuset de chaux, à l'aide de la flamme oxyhydrique, puis on laisse refroidir. Pendant la solidification, dont la durée dépend de la quantité de platine fondu, on observe la lumière émise par la surface du bain à travers un écran percé d'un orifice de 1 centimètre carré.

Le Congrès des Électriciens de 1889 a recommandé, comme étalon secondaire, l'emploi de la *bougie décimale* valant un

vingtième de l'étalon Violle. Cet étalon représente un peu plus du dixième de la Carcel. Il équivaut au dixième d'une Carcel brûlant 43,7 grammes d'huile à l'heure.

On remarquera que les lampes étalons fournissent leur intensité normale, prise pour unité, suivant l'horizontale, tandis que l'étalon Violle doit être considéré suivant la direction verticale. On emploie, dans ce dernier cas, des réflecteurs pour faire les comparaisons avec les autres lampes.

Voici quelques indications sur les valeurs comparatives des principaux étalons ; il existe toutefois à ce sujet des différences appréciables entre les divers expérimentateurs.

Suivant M. Violle, une Carcel vaut :

0,481 étalon Violle,
9,62 bougies décimales,
8,91 candles (bougies anglaises),
7,89 kerzen (bougies allemandes),
9,08 étalons Hefner,

D'après la relation

$$e = \frac{I \cos \alpha}{r^2}, \qquad \S\, 724,$$

l'unité d'éclairement est l'éclairement fourni par une lampe étalon sur un écran normal au rayon lumineux et situé à l'unité de distance de la source. Souvent dans les mesures, on prend comme unité de longueur le mètre. L'unité d'éclairement sera, par suite, exprimée par *une Carcel à un mètre* ou *une bougie décimale à un mètre*. Cette dernière unité est appelée *lux*.

Il faut remarquer que la formule précédente n'est vraie que pour autant qu'on néglige les phénomènes de réflexion et de diffraction. Il faut donc employer, pour la vérifier, des écrans d'un blanc mat. D'après des recherches faites par M. Seeliger avec les meilleurs écrans, on ne peut admettre l'exactitude de la proportionnalité au cosinus de l'angle d'incidence qu'à la condition que cet angle soit inférieur à 50 degrés.

L'unité d'éclat est l'éclat d'une lampe étalon. L'éclat d'une candle étant 1, celui du disque solaire est 40 000, celui du platine fondant et d'une lampe à incandescence 50, enfin celui de l'arc voltaïque (cratère) 800.

726. — **Méthodes photométriques.** — La plupart des photomètres usuels sont basés sur la loi des distances. Deux moitiés d'un écran sont éclairées sous des incidences égales par les deux sources à comparer. On déplace celles-ci jusqu'à ce que les éclairements qu'elles produisent soient égaux.

En désignant alors par I et I′ les intensités des deux sources, par $d$ et $d'$ leurs distances à l'écran

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}. \qquad (1)$$

La mesure doit se faire dans une chambre à parois d'un noir mat, afin d'éviter les reflets sur l'écran. Le cube de la chambre doit être assez grand, parce que les étalons à flamme sont altérés par l'air vicié. Il faut que, pendant les mesures, l'écran ne soit frappé que par les faisceaux lumineux émis par les sources à comparer et, en outre, que ces faisceaux ne puissent être vus directement par l'observateur. Celui-ci emploie, dans ce but, une grande visière noire qui ne donne accès qu'aux rayons réfléchis par l'écran.

Lorsque les foyers comparés sont très inégaux, on est dans l'alternative de reculer l'un d'eux à une distance plus grande que ne le permet la salle d'essai ou de rapprocher la lampe la plus faible de l'écran, au point que l'éclairement de ce dernier cesse d'être uniforme. Pour éviter ces difficultés, on emploie une source lumineuse d'intensité intermédiaire, qu'on compare simultanément aux lampes essayées. Comme étalons intermédiaires, on emploie soit des lampes à pétrole, soit des lampes à incandescence.

La fig. 478 montre le plan d'une chambre noire AA, dans laquelle deux bancs photométriques P et P′ sont séparés par une cloison B. Les lumières à comparer sont disposées en L et C, tandis que la source intermédiaire est placée en S.

Une autre méthode, préconisée par MM. Ayrton et Perry, consiste à interposer sur le faisceau émis par le foyer le plus intense un diaphragme dans lequel se trouve une lentille divergente biconcave.

Si le foyer est à une distance $l$ de la lentille, la divergence des

rayons qui frappent l'écran est accrue comme si la source était au foyer conjugué, écarté de la lentille d'une distance $l'$ telle que

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f}, \qquad (2)$$

$f$ étant la distance focale principale de la lentille.

Par suite

$$l' = \frac{lf}{l+f}.$$

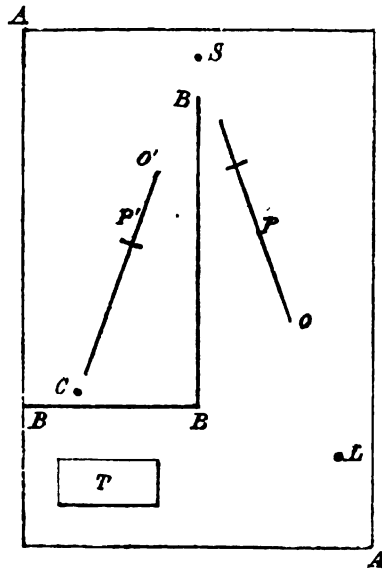



Fig. 478.

Désignons par $\rho$ le rayon du cercle éclairé sur l'écran lorsque le faisceau traverse le diaphragme sans lentille, et par $\rho'$ le rayon du cercle agrandi par l'interposition de la lentille, dans le diaphragme. Le rayon de celui-ci étant $r$ et sa distance à l'écran $\delta$, on a

$$\frac{\rho}{r} = \frac{l+\delta}{l}$$

$$\frac{\rho'}{r} = \frac{l'+\delta}{l'},$$

d'où

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{l\,(l'+\delta)}{l'\,(l+\delta)}$$

et en remplaçant $l'$ par sa valeur

$$\frac{\rho'}{\rho} = 1 + \frac{\delta l}{f(l+\delta)}. \qquad (3)$$

Or, les intensités des éclairements produits sans et avec interposition de la lentille sont dans le rapport

$$\left(\frac{\rho'}{\rho}\right)^2 = \left(1 + \frac{\delta l}{f(l+\delta)}\right)^2.$$

Il faut donc, dans l'expression de la loi des distances, introduire, au lieu de la distance $d = l + \delta$, la distance virtuelle

$$d_1 = \frac{\rho'}{\rho}(l+\delta) = l + \delta + \frac{\delta l}{f};$$

mais, comme $l = d - \delta$,

$$d_1 = d + \frac{\delta(d-\delta)}{f} = d\left(1 + \frac{\delta}{f}\right) - \frac{\delta^2}{f}.$$

La formule (1) devient alors

$$\frac{I}{I'} = \frac{\left[d\left(1+\frac{\delta}{f}\right) - \frac{\delta^2}{f}\right]^2}{d^2}.$$

Il est à remarquer que, dans ces formules, on a négligé les réflexions sur la surface de la lentille, qui dépassent souvent 5 pour 100 de la lumière incidente. Il est donc préférable d'employer un étalon intermédiaire lorsqu'on étudie des foyers très différents.

On a vu, au § 724, que, lorsque les lumières sont hétérogènes, on facilite la comparaison de leurs intensités en ne comparant que les rayons de longueur d'onde $\lambda = 582$, qui sont entr'eux comme les quantités de lumière totales émises par les foyers.

Pour renseigner exactement sur les sources de lumière employées, il faut spécifier leur *degré d'incandescence*. Ce degré, défini par le Congrès des Électriciens de 1889, est le quotient des intensités, relatives à la carcel étalon, des radiations de longueurs d'onde $\lambda = 582$ (vert) et $\lambda = 657$ (rouge). Pour le déterminer, la lampe est comparée à une carcel et l'on place devant l'œil une cuve remplie, sous une épaisseur de 5 mm, de la solution de chlorure de nickel

et de fer laissant passer une lumière dont la longueur d'onde est voisine de $\lambda = 582$ ; soit *a* l'intensité de la lampe dans ces conditions. La même mesure est recommencée en plaçant devant l'œil un verre rouge laissant passer une lumière dont la longueur d'onde est voisine de $\lambda = 657$ ; soit *b* l'intensité de la lampe dans ces nouvelles conditions ; le rapport $\frac{a}{b}$ est le degré d'incandescence.

**727. — Photomètre Foucault.** — Cet appareil, employé particulièrement en France, comprend un écran en verre laiteux ou dépoli E, fig. 479, derrière lequel se placent les deux foyers à comparer A et B, séparés par une cloison C ; celle-ci est légèrement écartée de l'écran, de manière que les deux plages lumineuses dues aux sources soient limitées par une mince ligne d'ombre projetée par la cloison. On déplace les deux foyers ou l'un d'eux seulement, suivant la direction de son rayon, jusqu'à ce que les éclats des deux moitiés de l'écran paraissent égaux. Il suffit alors d'appliquer la loi des distances aux deux faisceaux lumineux frappant l'écran sous des incidences supposées égales.

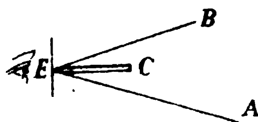


Fig. 479.

**728. — Photomètre Bunsen.** — Le photomètre Bunsen, très employé en Allemagne et en Belgique, repose sur cette observation qu'une tache d'huile faite sur une feuille de papier paraît brillante si le papier est éclairé par transparence et sombre si le papier est éclairé par réflexion. Il s'ensuit que si le papier reçoit des quantités de lumière égales sur les deux faces, la tache paraît se confondre avec le papier.

Si donc on dispose les deux foyers à comparer en A et B, la tache *o* semblera disparaître lorsque les intensités lumineuses satisferont à la loi des distances. Pour observer simultanément les deux faces de l'écran, on fait usage de miroirs plans *m p* et *m q* qui réfléchissent ces faces vers le spectateur. La disparition de la

tache tient à ce que la somme des quantités de lumière émises, par transparence et par réflexion, par le papier est égale à la somme de lumière correspondante fournie par la tache. Comme les coefficients de réflexion des deux faces de l'écran ne sont jamais identiques, la disparition de la maculature n'a pas lieu des deux côtés à la fois.

On peut déterminer par tâtonnements la position pour laquelle la tache a la même apparence sur les deux faces du papier et appliquer la loi des distances à cette position. Si l'on veut une exactitude plus grande, on retournera l'écran et l'on recommencera l'opération. On prendra la moyenne des résultats obtenus dans les deux mesures. Il est important de regarder les deux images avec le même œil, § 724.

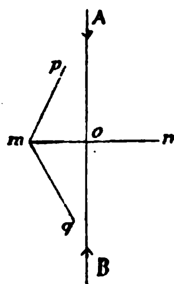



Fig. 480.

Pour préparer l'écran, on plonge un disque de laiton chauffé dans un bain de paraffine et l'on applique le disque sur une feuille de papier tendue. On fait ainsi un certain nombre de taches et on choisit la meilleure. On enlève l'excès de paraffine en étendant sur l'écran un papier buvard qu'on recouvre d'un fer légèrement chauffé.

Pour de plus amples détails sur les photomètres précédents, nous renverrons au *Traité de photométrie industrielle*, de M. A. Palaz.

729. — **Photomètre Rumford.** — Dans le photomètre Rumford, très usité en Angleterre, les deux foyers à comparer sont placés du même côté d'un écran blanc sur lequel une tige porte deux ombres A' et B' éclairées respectivement par le foyer situé du

même côté. On a soin de rendre égales les incidences des deux rayons AA′ et BB′. On écarte l'un des foyers jusqu'à ce que les

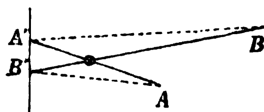



Fig. 481.

ombres paraissent également éclairées, et l'on applique la loi fondamentale aux distances A′B et AB′.

730. — **Intensité moyenne sphérique.** — L'intensité lumineuse d'un foyer n'est pas la même dans les diverses directions ; la flamme d'une bougie, par exemple, émet des rayons plus intenses dans les directions horizontales que dans les directions obliques par rapport à l'horizon. La lampe soleil, § 722, n'éclaire que d'un seul côté du bloc calcaire. Or, la valeur d'un foyer dépend, dans certaines circonstances, de l'éclairage moyen qu'il peut produire sous divers angles, en sorte qu'il est intéressant de mesurer l'intensité lumineuse, rapportée à l'étalon, non seulement dans une direction horizontale, mais encore dans les divers azimuts et sous diverses inclinaisons, l'intensité de la lampe étalon étant considérée dans une direction invariable.

On arrive à ce résultat par les photomètres précédents en substituant à la lumière étudiée un miroir mobile susceptible de renvoyer vers l'écran la lumière qu'il reçoit de la lampe essayée, lorsque cette lumière fait des angles variables avec l'horizontale. On compare l'éclairement de l'écran par le faisceau réfléchi à l'éclairement donné par la lampe étalon, dans diverses positions de la lampe étudiée. On note l'inclinaison du rayon ainsi que son parcours total et l'on applique la loi des distances, en tenant compte du coefficient d'absorption du miroir, dont les valeurs ont été déterminées au préalable pour les diverses incidences.

Le miroir porté par le banc photométrique est incliné de 45° sur l'axe horizontal autour duquel il tourne. Afin de conserver constante la distance de la lampe au miroir, pour ne pas avoir à mesurer cette distance à chaque essai, on utilise le procédé suivant. La lampe est suspendue à une poulie mobile suivant une direction

horizontale normale au banc photométrique. Le foyer est lui-même susceptible de se déplacer verticalement, de telle sorte qu'il décrit un cercle dont le centre coïncide avec celui du miroir.

Le procédé précédent a l'inconvénient d'exiger la détermination des coefficients d'absorption du miroir. Un procédé plus direct consiste à incliner le photomètre de manière que l'écran conserve une position convenable par rapport aux deux sources placées à des hauteurs différentes. On construit dans ce but des photomètres Bunsen mobiles autour du point *m*, fig. 480, et dont les extrémités *p* et *q* portent en saillie des réticules dont les ombres se superposent sur l'écran lorsque celui-ci est orienté suivant la bissectrice de l'angle des faisceaux incidents.

731. — **Photomètre Rousseau.** — Les manières de procéder ci-dessus supposent que la lampe essayée conserve une intensité invariable pendant les mesures successives ; sinon les résultats obtenus ne seraient pas comparables entr'eux. Or, les lampes à arc, auxquelles on applique particulièrement ce mode d'investigation, sont instables. M. Rousseau est parti de l'idée que, pendant les variations de l'arc, les intensités dans les diverses directions conservent les mêmes valeurs relatives, pour réaliser un photomètre dans lequel on compare l'intensité de la lumière émise sous divers angles à l'intensité émise par la même lampe dans une direction déterminée, telle que l'horizontale.

La lampe, fig. 482, est suspendue derrière le centre d'un disque opaque portant sur sa face antérieure une graduation en 360 degrés. Autour du disque se meuvent deux alidades radiales portant des miroirs N, M et des tiges métalliques *n*, *m* destinées à porter ombre sur un écran DC. Ce dernier est fixé normalement à une coulisse H que deux tringles articulées KH et IH maintiennent suivant la bissectrice de l'angle des alidades. L'une de celles-ci est disposée suivant l'horizontale, l'autre suivant la direction pour laquelle on cherche l'intensité relative. On tourne les miroirs M et N, articulés sur des genouillères, de manière qu'ils réfléchissent la lumière de la lampe vers l'écran D C. Les incidences des rayons réfléchis sur l'écran sont égales par le fait de la disposition adoptée. Les deux tiges *m* et *n* portent sur celui-ci deux ombres.

L'ombre produite par un des faisceaux est éclairée par le faisceau

voisin. On déplace les miroirs sur les alidades jusqu'à ce que les deux ombres paraissent de même intensité. Si alors $d$ et $d'$ représentent le double des distances de chacun des miroirs à l'écran,

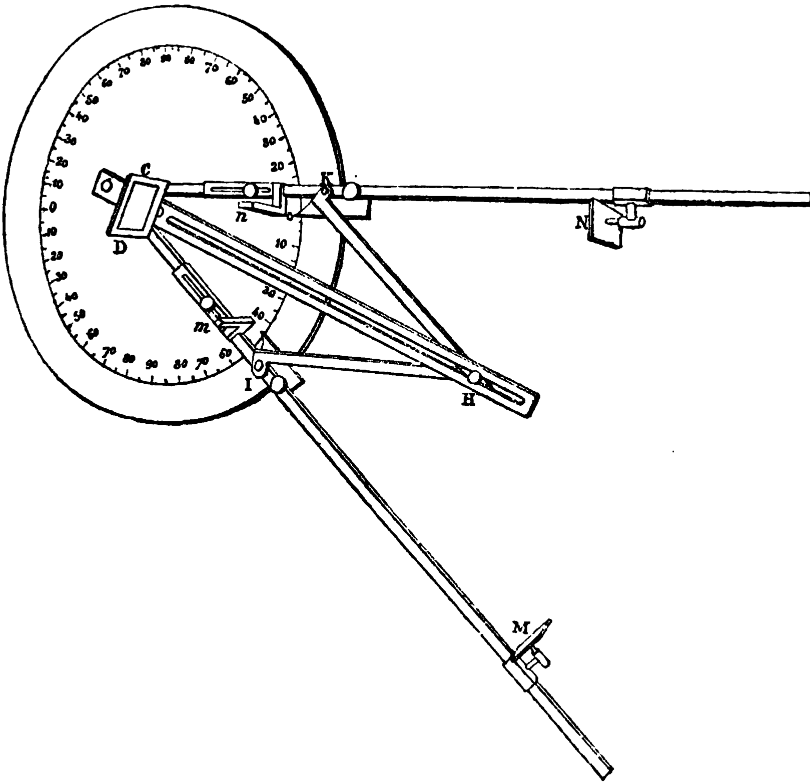



Fig. 482.

on a, comme précédemment, en appelant $i$ et $i'$ les intensités des faisceaux comparés,

$$\frac{i}{i'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

La comparaison, sous une direction unique, de la lampe étudiée avec une lampe étalon fournit l'expression des intensités absolues dans les diverses directions.

**732. — Détermination de l'intensité moyenne sphérique.**— Si l'on porte suivant les diverses directions prises dans un azimut, à partir d'un point A, fig. 483, des longueurs proportionnelles aux intensités lumineuses dans ces directions, l'intensité maxima AE étant représentée par l'unité de longueur, on obtient pour une lampe à arc voltaïque une courbe telle que A B C D E F. Pour une lampe qui rayonne également dans les divers azimuts, la surface obtenue en portant des longueurs semblables sur toutes les directions passant par le point A est une surface de révolution dont la courbe figurée est une section méridienne.

M. Rousseau représente la répartition de l'éclairage comme le montre la fig. 483. Des longueurs proportionnelles aux diverses intensités sont portées normalement à une droite P'Q' sur les abscisses correspondant aux extrémités des rayons de la circonférence de centre A.

Fig. 483.

On démontre que *l'intensité moyenne sphérique* du foyer, c'est à dire la moyenne des intensités obtenues dans les diverses directions considérées autour du point A, est à l'intensité maxima

A E comme la surface P′ B′ C′ D′ E′ F′ Q′ est à la surface du rectangle P′ R S Q′. Soit, en effet, $i$ l'intensité dans une direction A D faisant un angle $\alpha$ avec l'horizontale; la zone sphérique correspondant à deux rayons infiniment voisins AD, AM a une surface $2\pi \cos\alpha d\alpha$, la sphère ayant l'unité pour rayon. La quantité de lumière qu'elle reçoit, déduite de la formule (3) du § 724, est $2\pi i \cos\alpha\, d\alpha$.

L'éclairement moyen de la zone limitée par les rayons A D, A F, faisant des angles $\alpha$ et $\alpha'$ avec l'horizontale, s'obtient en faisant le quotient de la quantité de lumière,

$$\int_{\alpha}^{\alpha'} 2\pi\, i \cos\alpha\, d\alpha;$$

par la surface de la zone correspondante

$$2\pi\,(\sin\alpha' - \sin\alpha).$$

Mais, d'après la construction de la figure, la surface F′ $f$ $d$ D′ E′ représente la valeur de l'intégrale

$$\int_{\alpha}^{\alpha'} i \cos\alpha\, d\alpha,$$

et comme le rectangle $d$ K L $f$ a pour hauteur l'unité, il a pour mesure sa base

$$f\,d = \sin\alpha' - \sin\alpha.$$

L'intensité moyenne dans la zone considérée est donc mesurée par le rapport

$$\frac{\text{Surf. } d\ \text{D}'\ \text{E}'\ \text{F}'\ f}{\text{Surf. } d\ \text{K}\ \text{L}\ f}.$$

L'éclairement moyen de la sphère entière sera donné par le rapport de l'aire curviligne totale à l'aire rectangulaire qui la circonscrit.

Par conséquent, pour calculer l'intensité moyenne sphérique en fonction de l'intensité maxima, il suffit d'évaluer les deux surfaces en se servant du planimètre, ou en décomposant l'aire curviligne en une série de petites surfaces et en appliquant la règle de Simpson.

Pour les lampes à arc à courant continu, il suffit de mesurer les intensités lumineuses de 10° en 10° sous l'horizon et de 30° en 30° au-dessus.

M. Rousseau a reconnu, en ce qui concerne ces lampes, que l'intensité horizontale varie dans les différents azimuts, par suite d'une obliquité que présente fréquemment le cratère, mais l'intensité maxima correspondant à un angle d'environ 40° est approximativement constante dans tous les plans verticaux passant par le foyer.

733. — **Courbes d'éclairement.** — Les méthodes photométriques précédentes ne s'appliquent qu'aux foyers de petites dimensions. Un foyer lumineux de grandes dimensions, tel que le globe opalin qui recouvre une lampe à arc, se prête mal à la mesure, par suite des pénombres qu'il produit.

Il est cependant intéressant de photométrer une lampe munie de son globe, attendu que celui-ci détermine une répartition toute différente de la lumière qu'il disperse dans toutes les directions. En outre, il est bon de connaître le coefficient d'absorption moyen, qui varie de 15 à 40 pour 100 suivant qu'on emploie un globe dépoli, opalin ou laiteux.

Un autre problème, qui ne peut être résolu par les méthodes photométriques ordinaires, est la répartition de l'éclairement fourni par un foyer dans une salle ou dans un espace découvert.

Pour ce dernier cas, le calcul permet d'arriver aisément à la solution, lorsqu'on connaît l'intensité des rayons émis par les foyers dans les diverses directions et qu'on suppose n'exister aucune paroi réfléchissante ni diffusante. Ainsi, l'éclairement produit par un rayon lumineux d'intensité $i$ bougies sur une surface située à une distance $r$ mètres du foyer est, en appelant $\alpha$ l'angle d'incidence, c'est à dire l'angle du rayon avec la normale au plan éclairé,

$$\frac{i \cos\alpha}{r^2} \text{ bougies à 1 m,} \qquad \S\, 727.$$

Supposons qu'on ait calculé d'après cette formule la répartition sur le plan horizontal de l'éclairement fourni par un foyer. On pourra représenter la distribution de la lumière dans un plan

vertical passant par la lampe, en prenant comme abscisses les distances au pied du foyer et comme ordonnées les valeurs des éclairements. S'il y a plusieurs foyers en ligne droite, on construira la courbe d'éclairement pour chaque foyer et, en additionnant les ordonnées correspondant à une même abscisse, on déterminera les ordonnées de la courbe d'éclairement résultante.

Voici un autre procédé graphique, emprunte au système des projections cotées et applicable à des foyers distribués d'une manière quelconque au dessus du plan horizontal, par exemple aux réverbères éclairant une place publique. Sur un plan de la surface à éclairer, on indique la position des sources lumineuses et l'on trace autour de celles-ci des circonférences concentriques, représentant les lieux des points d'égal éclairement relatifs aux foyers considérés isolément. En additionnant en un nombre de points suffisant les cotes d'éclairement qui se rapportent aux diverses lampes, il est possible de tracer les courbes d'égal éclairement relatives à l'ensemble des foyers.

734. — **Photomètre L. Weber.** — Le photomètre suivant permet de mesurer directement l'éclairement d'une surface. L'appareil comprend deux tubes A et B noircis intérieurement. Le premier est fixé horizontalement sur un pied ; le second est mobile autour

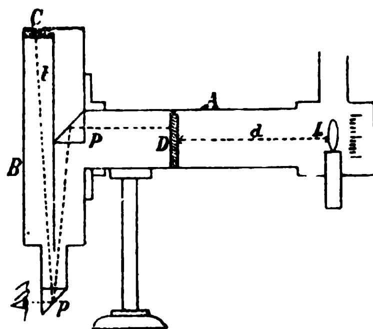



Fig. 484.

de l'axe de A et peut être incliné dans toutes les directions par rapport à l'horizon. Le tube A se termine par une lanterne pourvue d'une lampe étalon, laquelle envoie un faisceau divergent sur une

plaque laiteuse D qu'on peut mouvoir suivant l'axe du tube à l'aide d'un bouton extérieur.

La hauteur de la flamme étalon se lit sur une échelle, à travers une fenêtre allongée percée dans la paroi de la lanterne. Le tube B, fermé par une plaque laiteuse C, est divisé en deux parties par une cloison $t$. La plaque C est disposée suivant le plan dans lequel on veut mesurer l'éclairement, par exemple dans le plan horizontal comme l'indique la figure.

En regardant à travers l'orifice $p$, directement ou par réflexion dans un prisme, on distingue à gauche une partie de la plaque C éclairée par transparence grâce à la lumière d'un foyer ou à la lumière diffuse passant à travers les fenêtres de la pièce où l'on se trouve. A droite, on voit par réfraction dans un prisme P la plaque D éclairée par transparence par la lampe étalon.

En faisant varier la position de la plaque D, il arrive un moment où les deux plaques se détachent avec la même netteté, ce qui correspond à des éclairements égaux. Or, l'éclairement de la plaque D est, en appelant $d$ sa distance à l'étalon d'intensité égale à l'unité,

$$\frac{1}{d^2}.$$

Vu la distance de la lampe à la plaque, on ne commet pas d'erreur sensible en admettant que l'éclairement de cette dernière est uniforme. L'éclairement de la plaque C sera exprimé également par

$$\frac{1}{d^2}.$$

Lorsque les lumières à comparer ont des intensités très différentes, on peut employer des plaques plus ou moins absorbantes, qu'on a soin d'étalonner d'avance en plaçant devant le tube B, à une distance déterminée, un foyer d'intensité connue.

Le photomètre Weber permet de photométrer des foyers de grandes dimensions, tels que des lampes couvertes d'un globe laiteux, qui ne se mesurent que très difficilement avec les photomètres étudiés précédemment. Dans ce cas, on dirige le tube B vers le foyer, de manière que la plaque terminale soit frappée directement par les rayons émanant de la source.

Si les deux lumières sont de colorations très différentes, il est difficile de comparer les illuminations des deux plaques.

On a recours alors à l'artifice suivant. On remplace les plaques laiteuses par des plaques de verre dépoli portant une série de dessins ou de caractères de dimensions décroissantes et l'on recule la plaque D jusqu'à ce que le dernier dessin visible soit le même de part et d'autre, § 724.

On évite cette opération spéciale en interposant entre l'œil et le prisme *p* la solution donnant la longueur d'onde $\lambda = 582$, § 724.

M. Weber préconise l'emploi de verres colorés en vert et en rouge, les résultats étant corrigés d'après une constante déduite d'une détermination préalable, faite avec les plaques portant les dessins décroissants. (1)

Nous extrayons de l'*Électricien* la relation d'expériences faites, dans l'ancien local de l'Institut électrotechnique Montefiore, à l'aide du photomètre Weber. Les essais d'éclairement ont été exécutés dans un auditoire dont le plan est représenté dans les fig. 485, 486, 487 et 488. Pour expliquer l'influence des parois de la salle sur la répartition de l'éclairement, remarquons que les deux fenêtres étaient garnies de stores opaques. Les murs et le plafond sont blanchis à la chaux; la cloison opposée aux fenêtres est absolument nue; sur le mur de droite se trouve un grand tableau noir (*r s*), et des armoires vitrées occupent tout le fond de la salle comme le plan l'indique; enfin, les deux grands rectangles figurés sur les croquis représentent des pupitres et des bancs au milieu desquels s'élève une grande colonne marquée en hachures; devant le tableau est une table d'expériences. Pour comparer les éclairements obtenus avec différentes sources lumineuses, on a tracé sur le plancher de la salle des carrés de 2 mètres de côté, dont les sommets sont indiqués sur les figures par les lettres depuis *a* jusqu'à *q*. En ces points et à 1 mètre au-dessus du plancher, on

(1) Voir pour plus de détails : A. PALAZ, *Traité de Photométrie industrielle*. CARRÉ, Paris, 1892.

plaçait horizontalement la plaque objective du photomètre et l'on déterminait ainsi l'intensité d'éclairement des 16 points, en *bougies à 1 m*, avec les différentes sources lumineuses qu'on voulait comparer. Pour faire ressortir les résultats obtenus, on a représenté les lignes d'égal éclairement, tracées par interpolation entre les points dont les éclairements avaient été déterminés.

Les figures montrent les courbes dues aux quatre sources lumineuses suivantes :

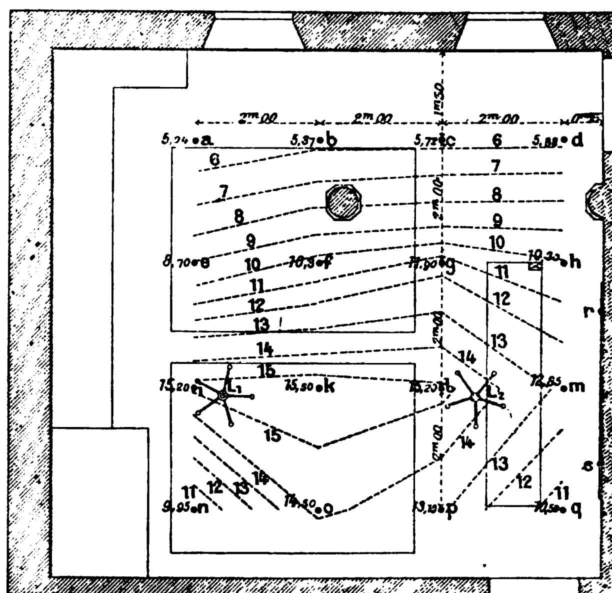


Fig. 485.

*Système d'éclairage : 10 lampes à incandescence Swan de 16 bougies chacune.*
Intensité du courant 14,37 ampères. — Force électromotrice 53,5 volts. — Puissance électrique 769 watts. — Élévation des lampes 4,7 m. — Élévation du photomètre 1 m.

N° 1. Dix lampes à incandescence de 16 bougies décimales, groupées sur deux lustres $L_1$ et $L_2$ ; chaque lampe était munie d'une cloche en verre dépoli.

N° 2. Une lampe à incandescence « Sunbeam » de 400 bougies sans globe ni réflecteur.

N° 3. Une lampe à arc, système Pieper, sans globe.

N° 4. La même lampe à arc avec un globe en verre laiteux.

On voit sur les figures les positions des foyers L ; les légendes indiquent les élévations des foyers au-dessus du plancher ainsi que les puissances électriques qu'ils absorbent.

D'après ces essais, on a pu comparer les effets des différentes sources sous le rapport de la répartition de la lumière et du rendement lumineux.

La valeur du rendement de chaque source peut être estimée par le rapport de l'éclairement moyen obtenu à l'énergie électrique absorbée.

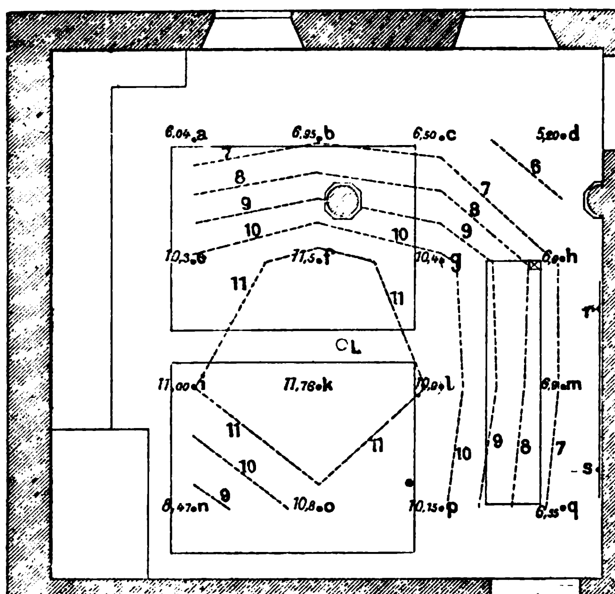



Fig. 486.

*Système d'éclairage : 1 lampe à incandescence « Sunbeam » (sans réflecteur).*
Intensité du courant 15,5 ampères. — Force électromotrice 50,2 volts. — Puissance électrique 778 watts. — Élévation de la lampe 4,2 m. — Élévation du photomètre 1 m.

La répartition est caractérisée graphiquement par les courbes d'égal éclairement et numériquement, pour un espace donné, par le rapport des intensités d'éclairement minima et maxima obtenues dans cet espace.

D'après les nombres inscrits près des 16 points de repère, les intensités moyennes d'éclairement sont respectivement 10,63, 8,77,

21,64 et 19,8 bougies à 1 m, et les puissances absorbées 769, 778, 305 et 308 watts. Les rendements lumineux sont donc entr'eux comme les nombres 138, 113, 710 et 645 et les rapports des intensités minima et maxima comme 0,40, 0,54, 0,33 et 0,50.

Ces nombres sont très favorables aux lampes à arc; sous le rapport de la répartition de la lumière, la lampe à arc sans globe donne le résultat le moins satisfaisant, tandis qu'avec globe elle

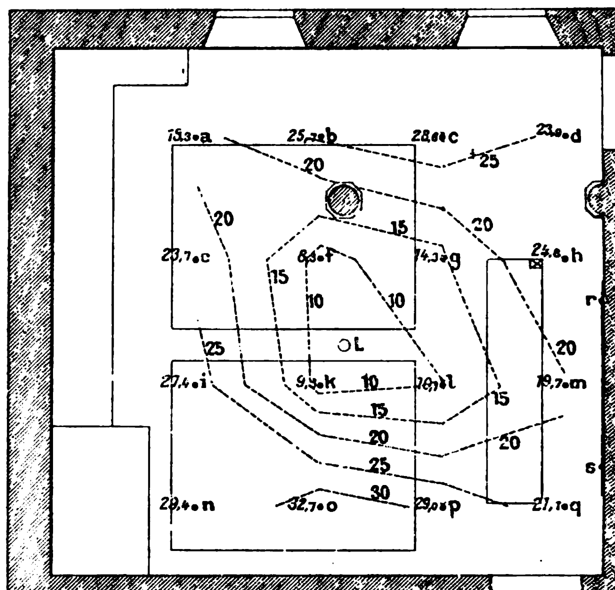


Fig. 487.

*Système d'éclairage : 1 lampe à arc Pieper (sans globe laiteux).*
Intensité du courant 7,67 ampères. — Force électromotrice 39,8 volts. — Puissance électrique 305 watts. — Élévation de la lampe 4,2 m. — Élévation du photomètre 1 m.

procure une bonne distribution, ce qui compense largement la légère perte de rendement.

La comparaison des répartitions lumineuses avec et sans globe conduit, comme l'on peut en juger par l'examen des fig. 487 et 488, à un contraste intéressant. Sans globe (n° 3), l'espace central est le moins éclairé (10 bougies à 1 m), et l'éclairement augmente vers les parois de la salle (où il atteint 25 à 30 bougies à 1 m); avec globe (n° 4), au contraire, c'est la partie centrale qui reçoit le plus

de lumière (30 bougies à 1 m), et l'éclairement va en diminuant vers les murs. Cette comparaison amène à penser qu'en modifiant les qualités dispersives du globe l'on pourrait s'approcher de la répartition pratiquement uniforme.

Les expériences que nous venons de relater constituent des jalons conduisant vers la solution du problème suivant : Étant

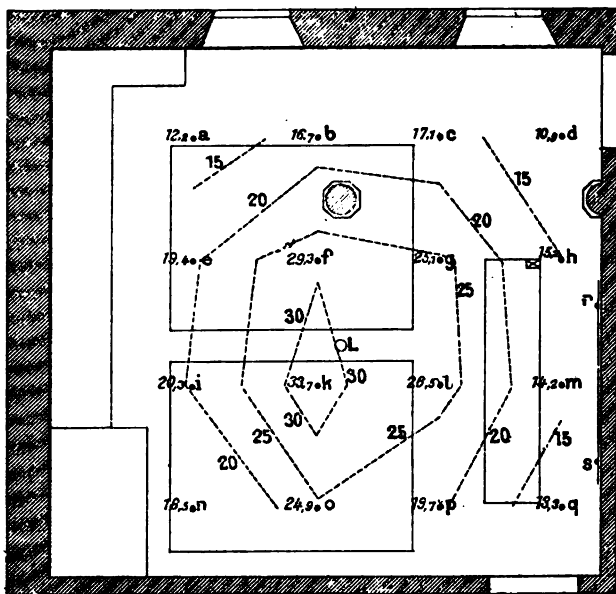



Fig. 488.

*Système d'éclairage : 1 lampe à arc Pieper (avec globe en verre laiteux).*
Intensité du courant 7,74 ampères. — Force électromotrice 39,8 volts. — Puissance électrique 308 watts. — Élévation de la lampe 4,2 m. — Élévation du photomètre 1 m.

donné un local à éclairer, déterminer le genre de foyers lumineux à employer et leur intensité. Ce problème peut difficilement recevoir une solution théorique, mais, en accumulant les résultats d'expériences, on procurera au praticien un guide sûr pour la résolution de toutes les questions d'éclairage.

## RENDEMENT LUMINEUX DES LAMPES ÉLECTRIQUES.

735. — **Lampes à incandescence.** — On mesure l'intensité horizontale moyenne d'une lampe à incandescence en faisant la

moyenne des lectures horizontales obtenues dans des azimuts différant de 22°5 ou de 45°. La fig. 489 montre la répartition de la lumière fournie dans le plan horizontal par une lampe Siemens essayée à l'Exposition d'Anvers en 1885 [1]. Pour cette lampe, dont le filament a une section rectangulaire et une forme en fer à cheval, l'intensité est maxima dans une direction à 45 degrés avec le plan du filament. La décroissance observée dans ce plan tient à ce que l'un des brins intercepte la lumière émise par l'autre et porte une ombre, très distincte sur une surface éclairée par la lampe et voisine de celle-ci.

Dans les plans verticaux, il y a des différences beaucoup plus marquées. Ainsi, la fig. 490 représente, pour la lampe Siemens ci-dessus, les courbes des intensités relatives et montre la distri-

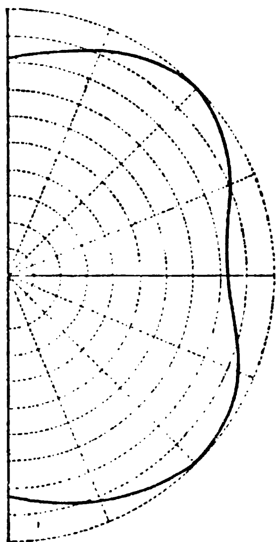


Fig. 489.

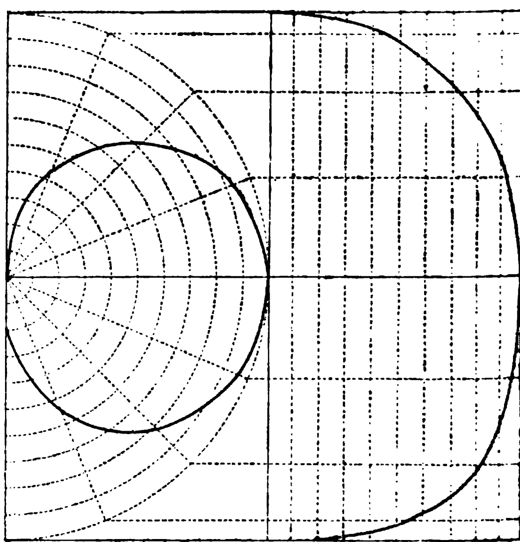


Fig. 490.

bution de la lumière dans les diverses zones, § 732, du plan du filament.

[1] *Comptes-rendus des essais électriques effectués à l'Exposition d'Anvers*. Vaillant-Carmanne, 1886.

L'expérience montre qu'en général les courbes figurant la répartition de la lumière suivant les diverses sections horizontales faites dans la sphère unité, § 732, sont semblables entr'elles et, par suite, semblables à la courbe obtenue dans le plan horizontal passant par le centre de la sphère. Il suffit donc de déterminer la variation lumineuse dans un plan vertical et dans un plan horizontal passant par le centre de la lampe pour calculer l'intensité moyenne sphérique de celle-ci.

Exprimons par $c$ le rapport entre l'intensité horizontale moyenne et l'intensité horizontale mesurée dans le plan du filament, et par $c'$ le rapport entre l'intensité moyenne sphérique et l'intensité horizontale moyenne. Voici les valeurs de ces deux constantes pour quelques lampes :

| | SIEMENS. | SWAN. | EDISON. |
|---|---|---|---|
| $c$ | 1,007 | 1,150 | 1,09 |
| $c'$ | 0,748 | 0,946 | 0,74 |

Très souvent on adopte l'intensité horizontale moyenne comme terme de comparaison, afin de faciliter les essais. Cette manière de faire est légalisée en Angleterre. Elle concorde d'ailleurs avec la pratique suivie pour les foyers à flamme.

L'intensité lumineuse des lampes dépend essentiellement de la puissance qu'elles absorbent. Elle peut se représenter approximativement, d'après M. Voit, par une fonction telle que

$$L = \alpha W^3,$$

où L est exprimé en candles et W en watts.

Le coefficient $\alpha$ dépend de la nature du filament et particulièrement de sa surface. Un filament renforcé possède un rendement optique presque double de celui d'un filament non renforcé. Le premier est gris clair, le second noir terne.

D'après la formule précédente l'erreur relative $\frac{dL}{L}$ qu'on peut commettre dans la mesure de l'intensité lumineuse est liée à

l'erreur faite dans la détermination de la puissance électrique par l'équation

$$\frac{dL}{L} = 3\frac{dW}{W}.$$

Par suite, si les observations photométriques sont faites à 1 pour 100 près, il conviendra qu'on ait

$$\frac{dW}{W} \leq \frac{0{,}01}{3} = 0{,}0033.$$

Or, comme la mesure de la puissance entraîne des lectures au voltmètre et à l'ampèremètre et comme les erreurs commises dans ces lectures peuvent être de même sens et s'ajouter, il y a lieu d'employer des instruments suffisamment précis pour ne pas occasionner une erreur sensiblement supérieure à 1,6 pour 1000. On n'arrive au résultat voulu qu'avec une source de courant très constante ; des accumulateurs très peu poussés sont seuls susceptibles de satisfaire à cette exigence.

D'après le vœu émis par le Congrès des Électriciens de 1889, l'indication de la puissance lumineuse d'une lampe devra à l'avenir être accompagnée de celle du degré d'incandescence auquel correspond cette puissance, § 726. Le degré normal est environ 1,1 pour les lampes à incandescence.

La durée d'une lampe dépend de la lumière qu'on exige d'elle. La position de la lampe a, en outre, une influence sur sa durée. Lorsque la lampe fait un angle avec la verticale, la flexion du filament, due au poids de ce dernier, tend à en hâter la rupture. Lorsque l'énergie électrique est à bas prix, il peut y avoir intérêt à diminuer le rendement afin de prolonger la vie des lampes.

L'affaiblissement du pouvoir lumineux d'une lampe à incandescence soumise à une différence de potentiel invariable est dû, d'après M. Nichols, pour un tiers au noircissement de l'ampoule et pour les deux autres tiers à l'accroissement de résistance provenant de l'amincissement du filament et aux rentrées d'air qui favorisent le rayonnement et refroidissent le filament.

Ainsi qu'il résulte des expériences de M. Larnaude, si l'on remplace les lampes lorsque l'intensité lumineuse a baissé de 15 pour 1000, on peut compter sur les durées suivantes :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1000 heures | pour les lampes consommant | 4 | watts par bougie | |
| 700 | — | — | 3,5 | — |
| 350 | — | — | 3 | — |
| 150 | — | — | 2,5 | — |

On peut fabriquer des lampes de grande durée avec un rendement lumineux considérable *au début*. Il suffit de déposer sur le noyau du filament une faible couche de charbon par le *renforcement*. Si l'on pousse vivement ces lampes, on obtient un excellent rendement, mais, une fois la couche de dépôt volatilisée, la résistance des filaments s'élève brusquement, le courant décroît et la lumière diminue. Les lampes continuent ainsi à fonctionner sans que les globes noircissent. Si, au contraire, l'épaisseur du dépôt est notable, la chute du courant n'est pas brusque et le carbone, en se volatilisant, noircit fortement la lampe lorsque le régime du courant est excessif. On peut constater l'artifice signalé en photométrant la lampe après quelques jours de fonctionnement ; on obtient, dans ce cas, un rendement très faible.

Il est à remarquer que les longs filaments bouclés de certaines lampes fabriquées pour les hautes tensions sont sujets à se briser lorsque, pendant le passage du courant, un choc vient à fermer la boucle sur elle-même. Les deux brins du filament sont ainsi mis en communication directe et le courant s'accroît brusquement au point de déterminer une rupture.

**736. — Lampes à arc voltaïque.** — La lumière émise par une lampe à arc ne présente pas la même distribution dans les divers azimuts par suite des déplacements du cratère, de sorte que la surface photométrique n'est pas de révolution et que, pour des mesures de grande précision, il convient de déterminer simultanément, au moins pour deux azimuts différant de 180°, les courbes de répartition des intensités lumineuses. Toutefois, les intensités maxima n'offrent pas de différences très sensibles ; c'est pourquoi on se contente, dans la pratique, de rechercher la répartition des rayons dans un azimut donné, pour faire le calcul de l'intensité moyenne sphérique.

On a vu, § 732, la méthode employée par M. Rousseau pour la représentation graphique des résultats.

Les deux diagrammes, fig. 491 et 492, indiquent par ce procédé

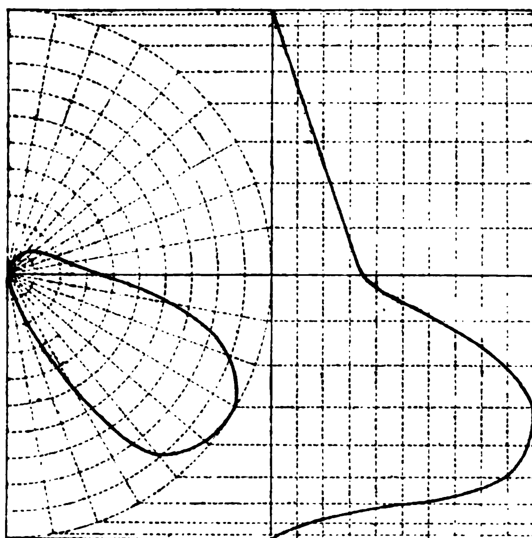


Fig. 491.

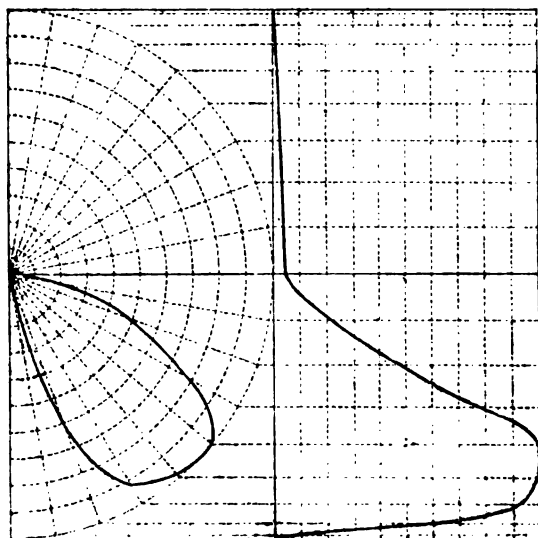


Fig. 492.

la répartition de l'éclairage pour une lampe Gramme de 13 ampères et pour une autre de 4 ampères, alimentées toutes deux par un courant continu.

Ces diagrammes montrent que les intensités sont assez faibles dans l'hémisphère supérieure, surtout avec les petits arcs, pour lesquels le charbon supérieur produit un cône d'ombre très ouvert. La courbe des intensités présente une inflexion dans le plan horizontal, puis son rayon vecteur croît rapidement dans l'hémisphère inférieure jusqu'à un angle d'environ 40° sous l'horizontale.

En pratique, pour abréger les mesures, on admet souvent que l'intensité moyenne sphérique d'une lampe à courant continu est donnée par la formule suivante, dans laquelle H est l'intensité horizontale et M l'intensité maxima qu'on mesure alors à 45° sous l'horizontale :

$$S = \frac{H}{2} + \frac{M}{4}.$$

M. Rousseau admet la formule simplifiée

$$S = 0{,}35\ M.$$

Lorsqu'on calcule l'effet utile des foyers, il faut tenir compte de l'absorption par les globes qu'on emploie pour disperser la lumière et atténuer sa crudité. On compte de ce chef une perte de 15 à 40 pour cent de la quantité de lumière totale. Il est à conseiller de souffler les globes de verre avec une couche opaline permettant de voir les crayons par transparence lorsque le foyer est éteint. Remarquons que les globes réduisent les inégalités de répartition des foyers lumineux. De plus, l'emploi de réflecteurs apporte une nouvelle modification dans la distribution des rayons.

Dans les calculs relatifs à l'éclairement, il faut nécessairement noter l'intensité des rayons émis sous les diverses inclinaisons, et, comme les objets à éclairer sont généralement sur le sol, la distance à laquelle un arc à courant continu peut éclairer utilement dépend beaucoup plus de l'intensité maxima que de l'intensité moyenne sphérique. C'est pour cette raison que les praticiens se contentent fréquemment d'exprimer la puissance lumineuse d'un foyer par l'intensité sous l'angle le plus favorable. D'autre fois, l'on considère la moyenne hémisphérique inférieure, laquelle est voisine du double de l'intensité moyenne sphérique.

D'après M. Palaz [1], l'intensité lumineuse maxima M, en bougies décimales, des arcs à courant continu fonctionnant, à feu nu, sous une tension de 40 à 50 volts, est donnée approximativement en fonction de l'intensité du courant $i$, en ampères, par la formule empirique suivante déduite des résultats des expériences d'Anvers :

$$M = 200\,i + 4\,i^2.$$

L'intensité horizontale H est voisine de 0,2 fois l'intensité maxima.

Enfin l'intensité sous une inclinaison $\theta$ par rapport à l'horizontale est exprimée, au dessus de l'horizon, par

$$H(1 - \sin\theta);$$

dans l'espace compris dans un angle de 40° sous l'horizon, par

$$H + 1{,}5557\,(M - H)\sin\theta;$$

dans l'espace situé entre l'inclinaison de 40° et celle de 45°, par M, et dans l'espace compris entre l'inclinaison de 45° et la verticale, par

$$3{,}413\,M\,(1 - \sin\theta).$$

M. Palaz détermine empiriquement l'énergie absorbée par les arcs à courant continu en se servant de la formule

$$S = 0{,}35\,M = 0{,}35\,(200\,i + 4\,i^2) \quad (1)$$

et en remarquant que la puissance dépensée est environ 50 $i$, 50 étant approximativement la différence de potentiel aux bornes de l'arc en série avec la résistance additionnelle.

Par suite, les watts nécessaires par bougie moyenne sphérique sont donnés par

$$w = \frac{50\,i}{0{,}35\,(200\,i + 4\,i^2)} = \frac{1}{1{,}4 + 0{,}028\,i}. \quad (2)$$

---

(1) *La Lumière Électrique*, t. 37, p. 408.

Le tableau suivant est calculé d'après les formules (1) et (2).

| INTENSITÉ DU COURANT EN AMPÈRES. | BOUGIES DÉCIMALES (MOYENNE SPHÉRIQUE). | WATTS DÉPENSÉS PAR BOUGIE DÉCIMALE (MOYENNE SPHÉRIQUE). |
|---|---|---|
| 4 | 302,4 | 0,662 |
| 6 | 470,4 | 0,638 |
| 8 | 649,6 | 0,616 |
| 10 | 840 | 0,595 |
| 12 | 1 041,5 | 0,576 |
| 14 | 1 254,5 | 0,562 |
| 16 | 1 477 | 0,542 |
| 20 | 1 960 | 0,510 |
| 30 | 3 360 | 0,446 |

Les essais effectués à l'Exposition d'Anvers ont montré que le rendement lumineux des arcs varie avec leur intensité lumineuse totale et, par suite, avec l'intensité du courant qui les alimente et la différence de potentiel aux bornes des lampes.

La lampe Pilsen a pris, sous une tension moyenne de 45 volts, 0,59 watt par bougie décimale (moyenne sphérique), résistance additionnelle non comprise, avec un courant de 8 ampères et 0,47 watt avec 16 ampères.

Une lampe construite spécialement pour fonctionner sous des différences de potentiel faibles, voisines de 38 volts, a absorbé une puissance de 0,9 watt par bougie décimale avec 4 ampères et de 0,75 watt avec 8 ampères. Cette réduction du rendement lumineux provient de la petitesse de l'arc et, par suite, de la grandeur du cône d'ombre porté par les charbons. Les bougies électriques Jablochkoff, essayées à l'Exposition de Paris de 1881, ont demandé 1,53 watt par bougie décimale.

La qualité du charbon a une influence considérable sur le rendement lumineux. On trouve dans le commerce des charbons dits à haut voltage qui demandent 45 à 46 volts au foyer et des charbons à faible voltage qui se contentent de 38 à 40 volts. Les premiers sont les plus employés. Selon leur grosseur, ils admettent des courants de 20 à 6 ampères, en produisant des arcs de 4,5 à 2,5 mm d'écartement, sans que la tension aux bornes varie sensi-

blement. M. Marks a trouvé qu'à égalité de puissance lumineuse les charbons durs employés aux États-Unis avec les lampes à très faibles tensions, 30 à 35 volts, absorbent environ 40 pour 100 de puissance en plus que les charbons tendres admis avec les tensions élevées.

On conclut de ce qui précède que les résultats déduits des essais usuels effectués sur les lampes à arc servent surtout à apprécier les charbons employés dans ces lampes et qu'il convient de noter soigneusement la qualité des crayons utilisés.

L'épreuve du système de régulateur devrait porter, non sur le rendement lumineux, mais sur la constance du foyer supposé relié à une source d'électricité invariable.

Les arcs alimentés par des courants alternatifs émettent des radiations lumineuses distribuées de la même manière au-dessus de l'horizon qu'au-dessous. Par suite, ces foyers ne sont pas aussi favorables que les foyers à courant continu à l'éclairage du sol, et l'on est obligé de les munir de grands réflecteurs, destinés à renvoyer leur lumière vers le bas, ainsi que de les disposer sur des mâts moins élevés que ceux qui supportent les lampes à courant continu. Avec les courants alternatifs, on estime que l'intensité moyenne sphérique est égale aux 0,9 de l'intensité horizontale.

Malgré les variations des courants alternatifs, l'éclairement produit par ces lampes paraît constant. Les changements d'éclat du foyer ne se décèlent que par l'éclairage d'objets se mouvant rapidement, lesquels produisent sur la rétine une série d'images discontinue.

Nous avons déjà fait allusion à cette circonstance que les arcs alternatifs, grâce à leurs propriétés et à l'emploi des bobines à réaction, n'exigent pas une différence de potentiel aussi élevée que les arcs à courant continu ; les premiers ne demandent que 32 à 35 volts entre les charbons, tandis que les seconds en exigent 43 à 44 pour la même puissance lumineuse. Il en résulte que, dans une distribution à 110 volts, on peut disposer trois lampes à courants alternatifs en série, tandis que le nombre de lampes à courant continu ne peut être supérieur à deux.

Les globes opalins ou dépolis, dont on munit les lampes à arc, modifient la répartition des rayons dans une mesure variable avec le pouvoir dispersif de ces globes.

La Commission instituée par la ville de Francfort pour l'examen

des appareils des deux systèmes a reconnu, à la suite d'expériences faites en se plaçant dans les conditions de la pratique, qu'à dépense d'énergie égale, résistances additionnelles comprises, les arcs à courant continu enfermés dans des globes présentent une supériorité de 20 pour 100 sur les arcs à courants alternatifs, au point de vue de l'éclairage intérieur des espaces clos.

La supériorité s'élève à 25 pour 100 dans le cas des espaces découverts, sans parois réfléchissantes. La consommation de crayons des lampes à courants alternatifs est de 20 pour 100 plus grande que celle des lampes à courant continu.

737. — **Comparaison des rendements optiques de diverses sources lumineuses. Méthodes de Tyndall et de Thomsen.** — Indépendamment des méthodes photométriques que nous avons énumérées et qui permettent de déterminer les valeurs comparatives des sensations produites par les foyers lumineux sur la rétine, il existe des méthodes se prêtant à des mesures objectives intéressantes. Telle est la suivante due à Tyndall.

Supposons qu'une lampe à incandescence soit enfermée dans un calorimètre en cuivre à doubles parois, l'intervalle entre les deux enveloppes étant parcouru par un courant d'eau dont on mesure la température à l'entrée et à la sortie, § 246. On parviendra à mesurer de cette manière la chaleur dégagée par la lampe en l'unité de temps, c'est à dire la puissance totale $w$ des radiations qu'elle émet.

Si l'on remplace le calorimètre en cuivre par un calorimètre formé de glaces polies, entre lesquelles circule également un courant d'eau, les radiations lumineuses traverseront pour la plus grande partie les parois, et la chaleur emportée par l'eau ne représentera que la puissance $w'$ des radiations obscures.

Le rendement optique de la lampe pourra être défini par le rapport $\frac{w - w'}{w}$.

Cette méthode donne les résultats suivants :

| NATURE DE LA SOURCE. | $\frac{w - w'}{w}$ |
|---|---|
| Bougie | 0,00293 |
| Lampe à pétrole | 0,00315 |
| Lampe à huile | 0,00442 |

| | |
|---|---|
| Gaz de houille . . . . . . . . . . . . | 0,00317 |
| Lampe à incandescence . . . . . . . . | 0,06 |
| Lampe à arc . . . . . . . . . . . . . | 0,10 |
| Tube de Geissler . . . . . . . . . . | 0,33 |

La proportion de rayons rouges est beaucoup plus grande dans les flammes hydrocarburées que dans les lampes à arc. Le degré d'incandescence, § 726, étant 1 pour la Carcel, atteint 1,1 avec les lampes à incandescence, 1,7 avec la lampe à arc et 2 dans le cas du soleil. L'arc voltaïque est donc la lumière artificielle qui se rapproche le plus de celle du jour. Sa lumière est, par suite, supérieure à toute autre lorsqu'il est important de conserver aux objets leurs couleurs propres. Si, au contraire, il ne s'agit que de distinguer du noir sur du blanc, les flammes rougeâtres sont équivalentes à intensité égale.

Une autre méthode, due à Thomsen, permet de mesurer les radiations émises par un foyer à l'aide de la pile thermo-électrique de Melloni et d'un galvanomètre. La pile est étalonnée au préalable en substituant au foyer à étudier une sphère remplie d'eau perdant en l'unité de temps une quantité de chaleur déterminée d'après les indications d'un thermomètre.

Si l'on interpose entre le foyer et la pile une solution d'alun qui jouit de la propriété d'être opaque pour les rayons obscurs, on mesure seulement les radiations lumineuses. En remplaçant l'alun par du sulfure de carbone, on relève les radiations totales. Cette méthode a l'avantage sur la précédente de se prêter à la détermination des radiations lumineuses sous diverses inclinaisons.

738. — **Éclairement des espaces découverts et des espaces clos. Données pratiques.** — La hauteur à laquelle on dispose les foyers puissants doit être relativement grande, afin de régulariser l'éclairement horizontal et de soustraire les lampes à la vue. Si l'œil est frappé par la lumière directe d'un foyer, la pupille, faisant fonction de diaphragme, se rétrécit et ne laisse entrer dans le globe oculaire qu'une quantité de lumière insuffisante pour permettre à la rétine de distinguer les objets peu éclairés. En outre, le contraste entre ceux-ci et la lampe diminue encore l'effet d'éclairement. Pour bien apprécier ces phénomènes physiologiques, il suffit de regarder les objets éclairés, d'abord en même temps que le foyer, puis en

dissimulant les rayons directs de la lampe à l'aide de la main ou d'une visière. La différence d'effet est remarquable.

La hauteur des foyers peut être déduite de considérations théoriques. Soit le cas d'une source lumineuse émettant des rayons d'égale intensité dans toutes les directions. L'éclairement produit à une distance $l$ suivant l'horizontale est, en appelant $h$ la hauteur du foyer d'intensité moyenne I,

$$e = \frac{I\cos\alpha}{r^2} = \frac{I\,h}{(l^2 + h^2)^{3/2}}. \qquad (1)$$

En considérant $h$ comme variable, il est facile de voir que $e$ est maximum pour

$$h = \frac{l}{\sqrt{2}}. \qquad (2)$$

L'angle d'incidence est alors 54°44′. Cette condition est rarement réalisable; ainsi, pour une distance $l = 50$ m, il faudrait des mâts de 35 m de hauteur.

Si l'on se donne la valeur de I et l'éclairement minimum à réaliser $e$, les relations (1) et (2) conduisent à

$$e = \frac{I}{5{,}2\,h^2} = \frac{I}{2{,}6\,l^2}. \qquad (3)$$

Cherchons à déterminer l'éclairement moyen produit par le foyer dans le cercle horizontal de rayon $l$. L'éclairement à la distance $x$, suivant l'horizontale, est

$$e = \frac{I\,h}{(h^2 + x^2)^{3/2}}.$$

La quantité de lumière qui tombe sur une couronne annulaire infiniment étroite de rayon $x$ est

$$dq = e \times 2\pi x\,dx = \frac{I\,h \times 2\pi x\,dx}{(h^2 + x^2)^{3/2}}.$$

La somme de lumière tombant dans le cercle de rayon $l$ a pour expression

$$q = 2\pi\,I\,h \int_0^l \frac{x\,dx}{(h^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{2\pi\,I\left(\sqrt{h^2 + l^2} - h\right)}{\sqrt{h^2 + l^2}}, \quad \S\ 724.$$

L'éclairement moyen du cercle est

$$e_m = \frac{q}{\pi l^2} = \frac{2\,\mathrm{I}\,(\sqrt{h^2 + l^2} - h)}{l^2 \sqrt{h^2 + l^2}}. \quad (4)$$

On tire de l'équation (4) la valeur, $l$ mètres, de la distance à laquelle une source d'intensité uniformément répartie, I bougies, et placée à une hauteur de $h$ mètres fournit un éclairement moyen de $e_m$ bougies à un mètre.

$$l = \sqrt{\frac{2\mathrm{I}}{e_m} - \frac{h^2}{2} - h\sqrt{\frac{2\mathrm{I}}{e_m} + \frac{h^2}{4}}}. \quad (5)$$

La table suivante, à triple entrée, est calculée d'après cette équation, jointe à la formule

$$\mathrm{I} = 0,35\,(200\,i + 4\,i^2).$$

| Intensité du courant (en ampères) d'un arc à courant continu. | 4 | 6 | | 8 | | | 12 | | | | | 16 | | | | 20 | | | 30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hauteur du foyer en mètres. | 8 | 8 | 10 | 8 | 10 | 12 | 8 | 10 | 12 | 15 | 20 | 10 | 12 | 15 | 20 | 12 | 15 | 20 | 20 |
| Distance du pied du foyer (en mètres) pour laquelle on obtient un éclairement : | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $e_m = 1$ | 19,01 | 25,5 | 24,1 | 31,3 | 29,7 | 28,1 | 41,2 | 39,7 | 38,1 | 37,0 | 30,7 | 48,3 | 46,6 | 44,9 | 40,6 | 55,6 | 53,6 | 49,5 | 69,8 |
| $e_m = 1,5$ | 14,4 | 19,7 | 17,8 | 24,4 | 22,7 | 20,8 | 32,5 | 31,0 | 29,2 | 20,6 | 20,4 | 38,4 | 36,9 | 34,4 | 29,3 | 43,9 | 41,5 | 37,0 | 54,1 |
| $e_m = 2$ | 11,3 | 16,5 | 14,1 | 20,3 | 18,4 | 16,2 | 27,4 | 25,8 | 24,0 | 20,8 | 12,9 | 32,3 | 30,6 | 27,9 | 24,1 | 36,8 | 34,3 | 29,2 | 44,6 |

Si l'on introduit dans l'équation (4) la condition (2)

$$h = \frac{l}{\sqrt{2}},$$

on obtient

$$e_m = \frac{0,84\ \mathrm{I}}{l^2} = \frac{0,42\ \mathrm{I}}{h^2}. \qquad (6)$$

Cette dernière formule permet de déterminer le rayon du cercle horizontal dans lequel une source lumineuse placée à la hauteur la plus avantageuse fournira un éclairement moyen donné.

Les foyers à arc donnant une répartition de lumière très inégale suivant les diverses directions d'un plan vertical, les équations précédentes ne leur sont pas rigoureusement applicables.

Si l'on trace dans un tel plan passant par le foyer, la courbe des éclairements produits sur le sol par ce dernier, on obtient, avec une sphère éclairante homogène, une ligne présentant une ordonnée maxima au pied de la lampe et descendant rapidement vers le sol de part et d'autre de celle-ci, § 733.

Avec un arc à courant continu, au contraire, l'éclairement est nul au pied du foyer (si l'on néglige la lumière diffusée par l'atmosphère et si l'on suppose que le foyer ne possède pas de réflecteur). La courbe des éclairements s'élève rapidement de chaque côté du foyer, présente un maximum, puis décroît asymptotiquement vers le sol. Les ordonnées maxima correspondent à des distances au pied du foyer sensiblement égales à la hauteur de celui-ci.

Le calcul de l'éclairement d'une salle présente de grandes difficultés, par suite du pouvoir diffusant des parois.

Le coefficient de diffusion atteint jusque 0,90 avec des murs blancs, mais il est généralement beaucoup inférieur dans les appartements.

Soit A le coefficient de diffusion d'une salle dans laquelle la quantité de lumière émise est Q. Une quantité de lumière A Q est renvoyée par les parois, tandis que la quantité $(1 - A)\,Q$ est absorbée. Une seconde diffusion rend de même une quantité de lumière $A^2\,Q$ et ainsi de suite. La lumière totale utilisable est

$$Q(1 + A + A^2 + \ldots) = Q\,\frac{1}{1 - A}.$$

Si $A = 0,50$, la salle paraît donc deux fois plus brillante que si les murs sont noirs. On voit l'importance de donner des teintes claires aux murs des appartements, au point de vue de la bonne utilisation de la lumière. Les salles d'atelier doivent être soigneusement blanchies à la chaux.

Un éclairement de luxe, permettant de lire commodément, est voisin de 10 bougies décimales à 1 m. La lumière diffuse du jour dans les appartements représente environ 50 bougies décimales à 1 m. Dans les ateliers exigeant beaucoup de lumière, comme les filatures, on demande 5 bougies à 1 m, tandis que dans les ateliers ordinaires, il suffit d'un éclairement général de 2 bougies à 1 m, indépendamment de l'éclairage spécial nécessaire pour certains outils.

Les places et les rues principales d'une ville exigent un éclairement moyen de 2 bougies à 1 m, tandis que les rues secondaires et les cours se contentent de 1 bougie à 1 m.

On exprime fréquemment en pratique l'éclairage d'un espace découvert ou d'un local fermé en divisant l'intensité totale des foyers par la surface horizontale éclairée. Ainsi 100 bougies placées dans une salle de 100 $m^2$ donnent un éclairage estimé à 1 *bougie par mètre carré*. Cette expression ne correspond pas à l'unité d'éclairement employée précédemment. M. Fontaine a reconnu toutefois que l'éclairement d'une bougie à un mètre peut être obtenu grossièrement, dans une salle, par une intensité lumineuse totale d'autant de bougies qu'il y a de mètres carrés dans l'emplacement considéré.

On a été amené dans les applications à adopter des règles empiriques analogues à la précédente, vu la difficulté dans les adjudications d'éclairages de ramener les foyers de différentes intensités à une base de comparaison équitable.

Divers systèmes ont été proposés à cet égard. L'Administration des Chemins de fer de l'État Belge, par exemple, a appelé en concurrence l'électricité et le gaz pour l'éclairage des gares, en exigeant un éclairement minimum d'environ 0,2 bougie à 1 m. Cette condition s'est montrée très avantageuse pour les petits foyers, la règle contenue dans la formule (3) conduisant dans le cas

présent, pour les grands foyers, à une hauteur inadmissible. Si, en effet, on pose I = 20 bougies et $e$ = 0,2, l'équation (3) devient

$$0,2 = \frac{20}{5,2\,h^2};$$

d'où $h$ = 4,4 m.

Lorsqu'on a affaire à un foyer pour lequel I = 1 000, la hauteur atteint 31 m, valeur tout à fait exagérée, parce qu'elle entraîne des mâts trop coûteux et que les lampes ont, à cette hauteur, un effet utile trop faible en temps de brouillard.

Pour être juste, il faut faire entrer en ligne de compte la quantité totale de lumière fournie par le foyer et utilisée grâce au pouvoir diffusant de l'atmosphère et des objets en relief sur le sol. On imposera dans ce but un certain éclairement moyen, calculé comme on l'a vu précédemment. Pour éviter de trop grandes inégalités dans l'éclairement, il suffit de prescrire en outre un éclairement minimum. Cette indication supplémentaire est d'ailleurs inutile si la hauteur des foyers est désignée aux soumissionnaires.

739. — **Qualités spéciales de l'éclairage électrique.** — Les économistes ont remarqué qu'on peut mesurer le degré de civilisation d'un peuple à la façon dont il s'éclaire. Il est certain que l'industrie de l'éclairage est une de celles qui contribuent le plus au bien-être et à l'hygiène et, à ce point de vue, il est incontestable que les lampes électriques réalisent un progrès considérable sur les autres illuminants.

Comparons ces systèmes au point de vue hygiénique. Une lampe à arc dégage, par heure et par 100 candles, 0,003 mètre cube d'anhydride carbonique et une quantité de chaleur de 60 calories (kg-d). La lampe à incandescence ne dégage pas d'anhydride carbonique et la chaleur produite est de 300 calories. En ce qui concerne le gaz, le bec d'Argand et le bec Manchester donnent respectivement 0,46 et 1,14 mètre cube d'anhydride carbonique, 4 860 et 12 150 calories. La lampe Carcel dégage 0,61 mètre cube d'anhydride carbonique et produit 4 200 calories. Or l'anhydride carbonique est nuisible dès qu'il dépasse la proportion de 6 volumes pour 10 000 et occasionne des maux de tête violents lorsque la proportion atteint 30 volumes. 5 $m^3$ de gaz exigeraient donc 10 000 $m^3$ d'air pour satisfaire aux lois de l'hygiène.

Ces chiffres montrent l'utilité de l'éclairage électrique pour éviter l'échauffement et la viciation de l'air des locaux. C'est particulièrement pour les théâtres, les clubs, les cafés, les magasins que cet avantage de la lumière électrique est apprécié. D'après M. Mascart, un bec de gaz de 120 litres consomme autant d'oxygène que dix personnes adultes. Or, comme dans les salles de spectacle on compte environ un bec par personne, l'air respirable est aussi appauvri par l'éclairage au gaz que si l'on décuplait le nombre des spectateurs, sans compter que le gaz développe, par une combustion incomplète, de l'acétylène et d'autres produits délétères.

Une atmosphère viciée par le gaz rend pénible le travail cérébral, ainsi que le travail physique. Il est incontestable que l'emploi de la lumière électrique dans les bureaux et les ateliers contribue à accroître la besogne effectuée par les employés et les ouvriers. D'après M. Preece, à la Savings Bank de Londres, où 1200 personnes sont employées et où l'on a substitué l'électricité au gaz, la diminution des absences pour maladie a été assez grande pour que l'augmentation du travail fourni par le personnel payât le supplément de frais d'éclairage occasionné par la substitution. Outre leur action nuisible sur l'organisme, les produits de la combustion, particulièrement de celle du gaz, altèrent les peintures, les décorations et les tentures.

L'avantage que présente l'arc voltaïque de conserver aux objets leurs tons naturels désigne ce système d'éclairage pour les industries où l'on doit discerner les couleurs : blanchiment du papier, triage des tissus, impression en couleurs, etc.

On reproche parfois à l'arc voltaïque de donner une teinte blafarde aux objets, parce qu'on prend pour terme de comparaison la lumière rougeâtre des flammes. Mais la lumière de l'arc est la seule capable de réaliser pratiquement un éclairement analogue, comme puissance et comme teinte, à celui de la lumière diffuse du jour.

Les lampes à arc conviennent tout particulièrement pour l'éclairage des grands espaces libres ou couverts. Il faut avoir soin de multiplier les foyers, de manière à éviter les ombres portées trop crues et à dissimuler les petites irrégularités dues à des défauts

des régulateurs ou des charbons. Ces lampes s'accommodent des moteurs employés dans les usines.

Les lampes à incandescence se prêtent mieux à la division de la lumière dans les appartements. Elles n'exigent aucun entretien, mais elles demandent une constance de courant plus grande que les lampes à arc et doivent, par suite, être alimentées par des moteurs spéciaux, à moins qu'on n'utilise des accumulateurs pour régulariser le courant, § 505. Lorsqu'on dispose des lampes à arc et des lampes à incandescence sur un même circuit alimenté par un générateur peu puissant, des précautions doivent être prises pour éviter que les irrégularités des premières n'occasionnent des vacillations dans l'éclat des secondes. Généralement, on dispose les lampes en dérivation et on les soumet à une différence de potentiel de 65 à 70 volts, qui permet d'ajouter une forte résistance additionnelle à la suite des arcs.

## USINES ÉLECTRIQUES.

**740. — Règles générales présidant à l'établissement des usines électriques.** — Les applications de l'éclairage par l'électricité se multiplient rapidement dans les villes, grâce aux distributions d'énergie électrique. Ces applications, qui se sont surtout développées aux États-Unis, où le prix élevé du gaz facilite la lutte sur le terrain économique, se répandent depuis quelques années en Europe, où il est peu de grandes villes qui ne possèdent ou ne projettent des usines électriques.

Les distributions d'énergie électrique peuvent aussi être utilisées à l'alimentation des moteurs domestiques et des moteurs industriels.

Les deux applications se complètent très heureusement au point de vue de l'utilisation des usines électriques qui, lorsqu'on n'emploie pas les accumulateurs, doivent produire l'énergie électrique au fur et à mesure de la demande Les moteurs sont des clients du jour, tandis que les lampes sont des clients du soir et de la nuit.

Aux États-Unis, où les moteurs électriques sont déjà très répandus, la demande moyenne d'énergie électrique pendant les 24 heures de la journée atteint parfois 40 pour 100 de la demande

maxima. Dans les usines européennes, la moyenne dépasse rarement 20 pour 100 du plus grand débit. Pour favoriser les clients du jour, il est recommandable de vendre l'énergie électrique à prix réduit en dehors des heures d'éclairage, ce qui permet de diminuer l'importance des frais généraux.

*Bâtiments.* Il est bon d'estimer très largement la surface de terrain nécessaire à l'établissement d'une station centrale, car la demande d'énergie électrique suit ordinairement une progression rapide et les agrandissements sont toujours très coûteux. Les bâtiments de la station doivent être écartés des habitations voisines, afin d'empêcher la propagation des vibrations par les murs et de soustraire éventuellement ces habitations aux dangers d'incendie. Les usines électriques sont construites en matériaux incombustibles. Il convient d'employer des chassis de fenêtre en fer, car le bois se déforme par la chaleur humide. Cependant, dans les salles renfermant des dynamos à haute tension, on fait usage de planchers en bois, afin d'isoler les ouvriers chargés de l'entretien de ces dernières.

A cause de la cherté du terrain à l'intérieur des villes, on est parfois obligé de disposer les machines à divers étages des bâtiments. A New-York, on est arrivé de la sorte à n'occuper que 0,18 $m^2$ de terrain par cheval. Toutefois, cette solution n'est qu'un pis aller. Il est bien préférable de disposer les machines et les générateurs de vapeur dans deux halles contiguës qu'on peut aérer et ventiler avec soin. Le toit de la halle des machines doit être assez élevé pour que le pont roulant qui y est établi puisse transporter les pièces de machine au-dessus des moteurs existants. On dispose généralement, en annexe aux bâtiments de la puissance motrice, des bureaux, des magasins, ainsi qu'un atelier de réparation pourvu de quelques machines-outils.

Lorsque l'emplacement fait défaut, on peut installer la salle de chauffe au-dessus de celle des machines, mais il ne faut en aucun cas mettre les machines au-dessus des chaudières, car la chaleur et la vapeur perdue rendent alors l'entretien des moteurs et des dynamos très difficile.

*Générateurs de vapeur.* Les générateurs de vapeur du type multitubulaire sont généralement prescrits par les règlements urbains, pour diminuer le danger des explosions. Ils permettent

une mise en pression rapide et une production de vapeur très active aux moments de la journée où la demande de courant est maxima. A Berlin, les chaudières Steinmüller, chaudes encore de la veille, peuvent être mises en pression en 20 minutes, lorsque le foyer est rempli de déchets de tissus imbibés de pétrole. Les chaudières multitubulaires occupent peu de place en surface, circonstance importante dans les locaux où l'espace est restreint. On observe une certaine tendance, particulièrement en Angleterre, à adopter des chaudières à foyers intérieurs. Ces générateurs réduisent les pertes par rayonnement et procurent de ce chef une économie notable de combustible. Au besoin, on emploie des ventilateurs soufflant sous les grilles pour activer les foyers et brûler plus complètement le combustible.

Les chaudières sont établies en batterie devant le dépôt de charbon. Elles sont souvent en contrebas de la rue pour qu'on puisse verser le combustible dans des soutes au niveau des grilles. Sous celles-ci sont disposés des wagonnets recevant les cendres et circulant dans un couloir souterrain d'où les résidus sont repris par un monte-charge. A l'intérieur des villes, de grandes précautions doivent être prises pour diminuer les fumées. Il convient de brûler des charbons secs ou anthraciteux. Les systèmes fumivores ont eu peu de succès jusqu'à présent. Le plus employé sert en même temps d'*économiseur* pour réchauffer l'eau d'alimentation : on fait passer les fumées entre des tuyaux traversés par l'eau arrivant aux chaudières; cette eau s'échauffe et les poussières en suspension dans les gaz de la combustion se déposent. On réduit l'entraînement de matières solides, qui se produit surtout lors du chargement, par l'emploi de *chargeurs automatiques* qui déterminent une combustion graduée du charbon. Ces appareils diminuent aussi la main-d'œuvre, mais ils ne permettent pas de pousser les feux aux moments du besoin, comme le chargement à la main.

*Eau.* Il est important de s'assurer une quantité d'eau suffisante pour l'alimentation ainsi que pour la condensation. Celle-ci ne procure pas seulement une économie de combustible, mais elle écarte la gêne occasionnée dans le voisinage de l'usine par la vapeur de décharge. Si l'on n'est pas à proximité d'une rivière

à laquelle on peut se relier par une conduite, on cherchera à obtenir l'eau par des puits. A l'usine de l'avenue Trudaine, à Paris, on a creusé dans ce but un puits artésien de 137 m de profondeur. Si la station est en dehors de la ville, il est possible d'économiser l'eau de condensation en la faisant resservir après refroidissement à l'air libre (systèmes Sée, etc.). Si la vapeur de décharge n'est pas condensée, on la fait passer, dans des *réchauffeurs* d'eau d'alimentation, autour de tuyaux traversés par l'eau à laquelle elle cède une partie de sa chaleur.

On recommande de disposer à l'usine un réservoir contenant la quantité d'eau nécessaire pour une journée de fonctionnement des chaudières. Si l'eau est impure, elle doit passer dans des *épurateurs*.

L'alimentation peut être rendue automatique de la manière suivante. Les deux pompes alimentaires, dont une de réserve, envoient l'eau dans un accumulateur hydraulique relié aux chaudières au moyen de tuyaux fermés par des valves. Chaque générateur contient un flotteur qui ouvre la valve d'alimentation lorsque le niveau s'abaisse. L'accumulateur, en descendant, met la pompe en marche au moment opportun.

*Moteurs et dynamos.* On divise la puissance motrice en un certain nombre d'unités; chaque unité comprend un moteur à vapeur attaquant une dynamo dans le cas d'une distribution à deux fils, et deux dynamos en série dans le cas d'une distribution à trois fils. Pour cette dernière application, on emploie communément des machines excitées en dérivation et simplement mises en tension, sans précaution spéciale. Le dispositif décrit au § 386 ne permettrait pas, en effet, de modifier séparément l'excitation de chaque dynamo pour faire face aux variations de la demande. Actuellement, en Angleterre, les distributions à trois fils, à 220 volts, utilisent des machines donnant directement cette tension et reliées aux conducteurs extrêmes. L'usine comporte, en outre, de petites dynamos à 110 volts qu'on introduit au moment du besoin dans celui des deux circuits le plus chargé, afin d'égaliser les tensions des deux branches. Le même résultat est obtenu en mettant des accumulateurs en dérivation sur les deux circuits et en faisant varier le nombre des éléments de manière à maintenir la même tension de part et d'autre.

On choisit la grandeur des unités motrices de manière à ne devoir mettre en marche que le nombre de machines strictement nécessaire et à faire fonctionner celles-ci dans des conditions de rendement maximum. Ce résultat est atteint lorsqu'une unité correspond au travail minimum demandé à l'usine. Les unités motrices ont une puissance variant de 300 à 1 000 chevaux suivant les usines.

Les opinions sont divisées sur le type des machines à adopter. Les moteurs à grande vitesse (200 à 300 tours par minute) permettent une réduction de poids et, par suite, de prix des machines et diminuent l'importance des transmissions ou, en cas d'attaque directe des dynamos, simplifient la construction de ces dernières. De nombreux électriciens sont cependant partisans des moteurs à faible vitesse (50 à 100 tours par minute), dont la marche est plus sûre et qui donnent lieu à moins de trépidations. Au point de vue de la dépense de combustible par cheval-heure indiqué, il y a un léger avantage en faveur des faibles vitesses. Ainsi, les machines Van den Kerchove et C[ie], de Gand, fournies à l'usine de la Spandauerstrasse de Berlin, donnent 1 000 chevaux à 75 tours et dépensent 6,5 kg de vapeur par cheval indiqué. Les machines Ball, livrées à la station Edison de Brooklyn, développent 300 chevaux indiqués à 250 tours et consomment 7,5 kg de vapeur par cheval. Les deux systèmes sont du type compound à condensation. Il faut, toutefois, remarquer que les frottements sont moindres dans les machines à grande vitesse, ce qui réduit la différence si l'on considère les travaux effectifs au lieu des travaux indiqués. La grande majorité des usines électriques de Londres utilisent les machines Willans à double et à triple expansion et à grande vitesse qui, couplées directement aux dynamos, donnent jusque 87 pour 100 pour le rapport de la puissance électrique utile à la puissance indiquée aux cylindres. La consommation de vapeur ne dépasse pas 6,8 kg par cheval indiqué. De telles machines peuvent se loger dans les espaces limités dont on dispose à l'intérieur des villes, fig. 493.

On cherche, autant que possible, à supprimer les courroies et les transmissions intermédiaires, qui absorbent inutilement une partie de la puissance motrice et exposent à des arrêts. L'ensemble d'un moteur et d'une dynamo sans transmission s'appelle ***dynamo à vapeur***.

Les grandes machines Van den Kerchove spécifiées ci-dessus commandent deux dynamos multipolaires Siemens disposées sur le prolongement de leurs arbres. De telles dynamos à faible vitesse sont nécessairement plus coûteuses que les dynamos des types courants.

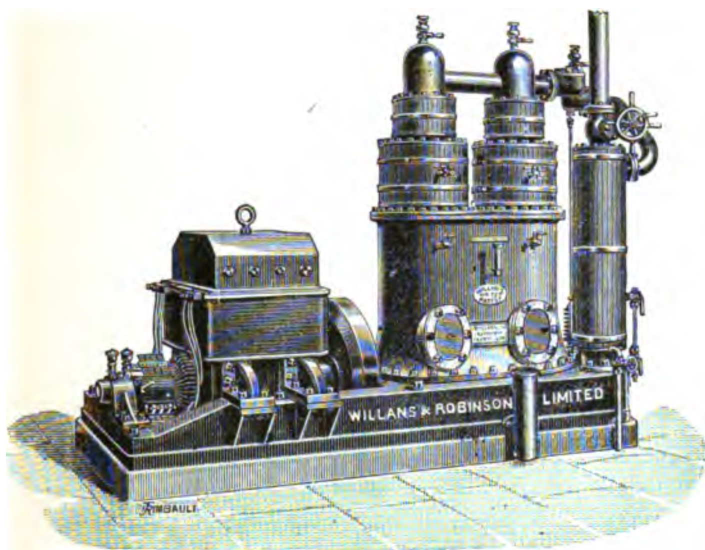



Fig. 495.

En cas d'attaque directe par un moteur compound à cylindres séparés, la dynamo peut être placée sur le prolongement de l'arbre ou servir de volant et être disposée entre les deux manivelles. La seconde combinaison évite des paliers supplémentaires. Lorsque le couplage n'est pas effectué par un lien élastique, tel que le joint Raffard, et qu'il existe des volants, il faut éviter de caler ceux-ci ; on les chasse sur l'arbre à la pression hydraulique de manière à leur permettre de tourner si l'arbre vient à s'arrêter brusquement par suite d'un court-circuit.

On se rappellera ici ce que nous avons dit au sujet des moteurs destinés aux stations de tramways. Si la demande d'énergie est sujette à des variations considérables et fréquentes, les moteurs à un cylindre sont préférables. Mais, dans les grandes usines pour l'éclairage, les variations sont lentes et l'on adopte d'ordinaire les types à double ou à triple expansion, chaque unité fonctionnant avec le degré de détente le plus économique.

On exige que les volants des moteurs soient suffisants pour éviter une variation de vitesse dans le tour supérieure à 1 pour 100. La vitesse ne doit pas varier de plus de 2 à 3 pour 100 entre le régime de marche à vide et la marche en pleine charge, le changement de régime devant se faire, sans oscillations, en 10 tours au plus.

*Condenseurs*. Les machines à faible vitesse sont généralement munies de leurs condenseurs. Les machines à grande vitesse, ne pouvant actionner une pompe sont pourvues de condenseurs indépendants. Deux condenseurs, dont un de réserve, servent alors pour une batterie de moteurs. Cette disposition a l'avantage de permettre de condenser dès la mise en marche des machines.

*Graissage*. Dans les usines électriques, les huiles, graisses, etc. constituent une dépense importante. Lorsque le type des machines s'y prête, on se trouve bien de la distribution de l'huile par des branchements établis entre un réservoir situé à un niveau supérieur à celui des moteurs et un réservoir situé à un niveau inférieur. L'huile, après avoir lubrifié les coussinets, tombe dans le second réservoir et, après filtration, est pompée dans le premier. Cette circulation continue favorise le bon emploi du lubrifiant. Comme un branchement peut s'obstruer, il convient de prévoir un graissage de secours.

*Tableau de distribution*. Le tableau de distribution doit dominer les machines, afin de permettre à l'électricien d'embrasser l'ensemble de celles-ci d'un coup d'œil. Il se compose généralement d'appareils fixés à des panneaux en ardoise ou en marbre soutenus eux-mêmes dans un chassis métallique. Il faut avoir soin de permettre les dilatations. Les pièces des rhéostats susceptibles de s'échauffer sont écartées des panneaux. Le tableau doit être suffisamment éloigné du mur d'appui pour qu'un homme puisse circuler librement derrière lui pour établir les connexions.

Parmi les appareils indispensables, notons les ampèremètres et voltmètres bien en vue, les interrupteurs, les rhéostats de réglage des machines, les adducteurs pour accumulateurs, les indicateurs de terre, les plaques de sûreté, les parafoudres, etc. Les pièces en cuivre sont souvent sans vernis et frottées de manière à conserver leur brillant. Les plaques de sûreté et les vis de serrage doivent être

fréquemment visitées pour empêcher les mauvais contacts de se produire.

Pour éviter les tableaux, souvent encombrants et coûteux, on peut commander les rhéostats et interrupteurs au moyen de leviers ou de manivelles reliés par des tringles à ces appareils, qui sont alors étalés sur le sol derrière un panneau. On verra dans la description de l'usine de Cologne un modèle de ce mode de commande. Cette disposition permet de mettre à l'abri toutes les pièces qui doivent rester hors de la portée des ouvriers, d'éloigner des instruments de mesure les conducteurs qui sont susceptibles d'altérer les indications de ceux-ci et, surtout, de concentrer les appareils de manœuvre dans un espace très restreint.

741. — **Usines électriques de Paris.** — La ville de Paris a concédé l'éclairage électrique à des compagnies dont chacune a obtenu une surface à éclairer correspondant à peu près à un secteur ayant son sommet vers le centre de la ville et sa base aux fortifications.

Les conditions du problème qu'avaient à résoudre les sociétés concessionnaires étaient à très peu près semblables ; cependant, comme on va le voir, les solutions adoptées ne manquent pas d'éclectisme.

La *Compagnie Edison* a établi, vers le centre de la ville, 3 usines desservant par des feeders un réseau à trois conducteurs. Ceux-ci sont des câbles nus posés dans des caniveaux et décrits au § 542. Les chaudières employées dans les stations sont des types multitubulaires Belleville ou Babcock et Wilcox. Les dernières machines sont des dynamos à vapeur Weyher et Richemond-Edison à triple expansion, faisant 300 tours par minute.

La *Société pour l'éclairage et la force par l'électricité* possède à l'intérieur de la ville 5 stations alimentant des réseaux restreints par le système de distribution directe à deux conducteurs. En outre, elle a monté à Saint-Ouen une usine où des dynamos à courant continu de 2 400 volts produisent l'énergie destinée à activer des transformateurs rotatifs disposés dans certaines des stations urbaines. Le réseau à basse tension est composé de câbles nus posés dans des caniveaux. Les chaudières adoptées par la Société sont surtout du type Belleville, les moteurs des systèmes Lecouteux et Garnier ou Weyher et Richemond, les

dynamos des modèles Deprez, Edison ou Desroziers. Les stations urbaines utilisent le secours d'accumulateurs de la *Société pour le travail électrique des métaux (Laurent Cély).*

La *Compagnie parisienne de l'air comprimé* possède, au boulevard Richard Lenoir, une usine pourvue de dynamos à vapeur Weyher et Richemond-Desroziers, lesquelles chargent en série des accumulateurs distribués dans des sous-stations situées vers le centre de la ville, § 509. Chacune de ces stations possède deux batteries chargées successivement et déchargées simultanément aux heures de grand débit. La canalisation est formée de câbles isolés au caoutchouc et tirés dans des caniveaux en fonte divisés par des cloisons en bois.

Une importante usine située à l'extrémité du secteur renferme des compresseurs destinés à produire l'air comprimé nécessaire à l'alimentation de moteurs à air distribués dans la ville et servant à mouvoir des dynamos ou d'autres machines.

L'usine unique de la *Société du secteur de Clichy* distribue l'énergie électrique par le système à cinq conducteurs, § 508. La station comprend des dynamos à vapeur Corliss-Siemens à 500 volts et des générateurs De Naeyer. Les câbles sont du système Siemens. La tension est régularisée dans les quatre circuits par des égalisateurs et par des accumulateurs.

Enfin, la *Société du secteur des Champs-Élysées* a installé une usine en dehors des fortifications, où des dynamos à vapeur Farcot-Hillairet produisent des courants alternatifs à 3 000 volts. Les chaudières sont du type Galloway. Des câbles concentriques, du système Berthoud-Borel, alimentent les transformateurs placés chez les abonnés.

742. — **Station Edison, à New-York.** — La fig. 494 donne une coupe d'une station construite par la Compagnie Edison à New-York. Le bâtiment, limité par des murs épais, présente une étendue de 30 m sur 17 m. Des charpentes et des pilastres massifs en fer et en fonte le divisent en 4 étages et un sous-sol. Tout le bâtiment est à l'épreuve du feu par l'emploi exclusif de matériaux incombustibles, tels que briques, tôles et béton.

Les moteurs à vapeur, placés dans le sous-sol afin de restreindre les vibrations, attaquent, à l'aide de courroies, les dynamos D D'

situées au rez-de-chaussée. Les chaudières sont disposées au deuxième étage ; les foyers débouchent dans un couloir central qui constitue la chambre de chauffe. Au-dessous, au premier étage, de vastes carneaux de fumée F conduisent les produits de la combustion vers deux cheminées établies aux extrémités du bâtiment. A

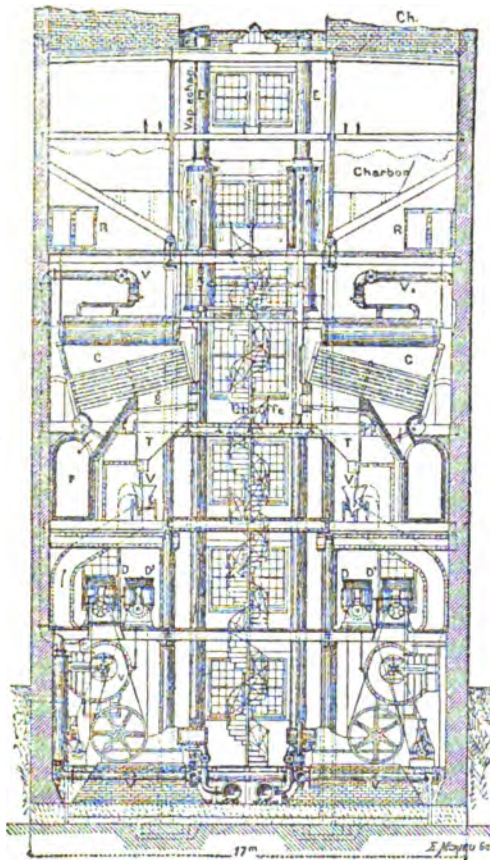



Fig. 494.

côté des carneaux, des voies de service sont parcourues par des wagonnets V destinés à l'enlèvement des scories et des cendres qui tombent par les trémies T. Au troisième étage sont des réservoirs d'eau R et des soutes à charbon. Celles-ci sont alimentées par des

voies de service situées au quatrième étage et aboutissant à des monte-charges qui élèvent les wagonnets remplis de houille. Trois escaliers en fer donnent accès aux divers étages.

Les moteurs Armington et Sims, au nombre de 14, fonctionnent à 200 tours par minute et ont une puissance totale de 2 800 chevaux. Ils sont alimentés par de la vapeur à la pression de 6,4 kg par cm², le degré d'admission étant 0,25. Il n'y a pas de condensation. Les machines reposent sur une fondation en briques et béton, dans laquelle passent les tuyaux de vapeur et d'échappement. De puissants ventilateurs V assurent le tirage forcé des foyers. Les tuyaux d'échappement E passent au milieu de réservoirs en tôle *r* qui servent de réchauffeurs pour l'eau d'alimentation.

Les dynamos, au nombre de 28, peuvent débiter 600 ampères à la tension de 140 volts, avec une vitesse de 650 tours par minute. Elles pèsent 6,7 tonnes chacune. Les murs du couloir central entre les dynamos sont occupés par le tableau de distribution comprenant les ampèremètres, les voltmètres et les régulateurs de champ magnétique.

Les chaudières multitubulaires, du type Babcock et Wilcox, sont alimentées par l'eau de la ville, pompée dans les réchauffeurs *r* et les réservoirs R. Les cheminées Ch., qui mesurent 50 mètres de hauteur à partir des carneaux F du premier étage, sont supportées à l'intérieur par d'énormes pilastres en fonte montant du sol jusqu'au second étage.

L'usine peut fournir le courant simultanément à 35 000 lampes de 16 bougies et desservir, par suite, un réseau contenant environ 50 000 lampes. Il est à remarquer que les abonnés emploient des lampes de diverses intensités, 10, 16, 25 et 32 bougies. On a ramené tous les foyers au taux uniforme de 16 bougies, par une proportion. En général, les deux tiers seulement du nombre total de lampes fonctionnent simultanément.

La distribution se fait par le système à trois conducteurs, § 485, lesquels sont disposés dans des tubes de 6 mètres, reliés par des boîtes dans lesquelles s'opèrent les prises de courant pour les dérivations. Les conducteurs, disposés des deux côtés des rues afin de ne pas gêner la circulation lors de l'ouverture des tranchées, sont enfouis à 60 cm de profondeur. Les feeders se relient dans des boîtes spéciales avec le réseau de distribution.

Dans une autre usine, construite plus récemment par la Compagnie Edison à Brooklyn, on a réduit notablement la hauteur des bâtiments, les chaudières ayant été disposées au rez-de-chaussée comme les machines à vapeur. Les dépôts de charbon et les réservoirs d'eau occupent le premier étage, de même que les dynamos; tandis que les couloirs de dégagement des cendres et les pompes sont dans les caves. Un second étage sert pour les bureaux et les magasins de la Compagnie.

Le bâtiment, mesurant 23 m sur 30 m, peut contenir 12 moteurs de 300 chevaux, 24 dynamos et alimenter 40 000 lampes de 16 bougies.

Dans la salle des dynamos, qui se trouve au-dessus de celle des moteurs, règne une galerie où l'on a placé le tableau de distribution. Un agent chargé de la manœuvre des appareils du tableau embrasse d'un coup d'œil les machines électriques. Un autre agent est préposé à l'entretien de ces dernières.

Le prix de la station de Brooklyn, de sa canalisation à trois conducteurs et des lampes est estimé à 3 200 000 fr. environ. Dans ce prix, le réseau souterrain, qui couvre un rectangle de 1 600 m sur 2 400 m, intervient pour près de 1 100 000 francs.

Le diagramme du débit de l'usine manifeste un courant moyen égal à 35 pour 100 du courant maximum.

**743. — Usines centrales de Berlin.** — Berlin compte un certain nombre de stations centrales, installées par une seule société et desservant un réseau de distribution à trois conducteurs, qui alimente environ 150 000 lampes de 16 bougies.

Les câbles employés sont du modèle Siemens et Halske, § 539.

Dans la nouvelle station de la Spandauerstrasse, on a accumulé tous les perfectionnements suggérés par une expérience de plusieurs années. Une grande salle de 11 m de hauteur, située à 3 m en contrebas de la rue, contient les moteurs et les dynamos. Au-dessus est un entresol de 3,60 m, puis vient la chambre de chauffe, laquelle a 7 m de hauteur. L'espace occupé par le bâtiment mesure 17 m sur 25 m.

Au lieu d'employer des machines de 200 à 250 chevaux et à grande vitesse, comme à New-York et comme on l'a fait antérieurement à Berlin, on installe actuellement des unités motrices de 1 000 chevaux, à faible vitesse. MM. Van den Kerchove et C^ie, de Gand, ont

construit pour la station de la Spandauerstrasse quatre machines verticales Corliss, du système compound à condensation, développant 1 180 chevaux indiqués et 1 000 chevaux effectifs à la vitesse de 75 tours. Ces moteurs sont construits de telle manière qu'un mécanicien peut effectuer d'un seul point toutes les manœuvres qu'entraîne une machine, y compris sa pompe à air et son servo-moteur de mise en marche.

L'eau de condensation des stations de Berlin est fournie par des puits et par des conduites reliées à la Sprée. L'arbre de chaque machine à vapeur entraîne directement les induits de deux grandes

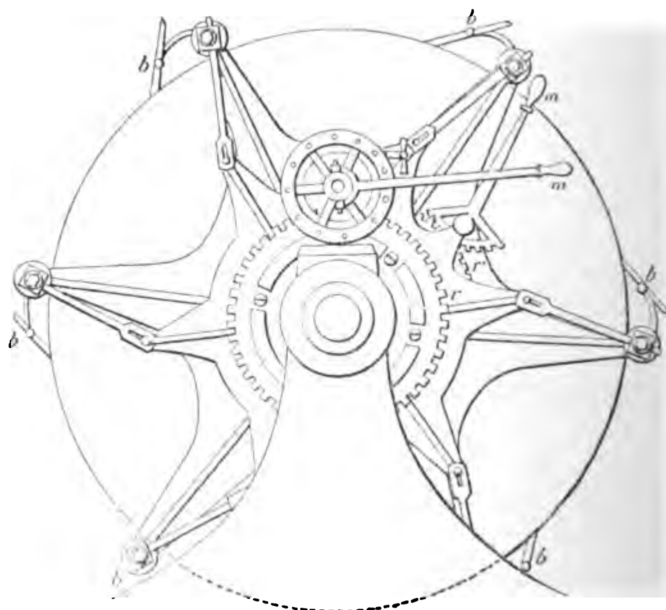



Fig. 495.

dynamos à 10 pôles, du type Siemens, § 403. Ces machines, dont un modèle hexapolaire est représenté dans la fig. 495, n'ont pas de collecteur distinct ; la périphérie de l'induit est pourvue de lames de cuivre sur lesquelles frottent directement les balais.

Les dynamos possèdent des induits de 3 m de diamètre et développent, à 80 tours, 2 000 ampères sous une tension de 140 volts.

L'excitation est en dérivation et les machines jumelles sont montées en tension pour effectuer la distribution par le système à trois conducteurs.

Les machines sont mises en marche au fur et à mesure de la demande. Avant de réunir une dynamo au réseau, on l'excite à vide, puis on la relie à un rhéostat, formé de bandes de nickeline, de manière à lui faire produire son débit normal.

Par suite du nombre restreint de dynamos, le tableau de distribution est fort simple. On l'a disposé sur une galerie surélevée, d'où l'on embrasse toutes les machines. A chaque dynamo est affecté un levier de manœuvre qui permet de l'isoler, de la relier au rhéostat de réglage ou de la mettre en communication avec l'un ou l'autre des circuits de la distribution à trois fils. On ne peut rompre le circuit des inducteurs que par un commutateur pourvu de deux charbons à séparation lente entre lesquels jaillit un arc destiné à absorber l'énergie de l'extra-courant et à empêcher la production d'étincelles dangereuses pour l'enroulement.

Les feeders qui partent de la station sont réunis entr'eux à l'origine. Leurs résistances sont égalisées à l'aide de bandes de nickeline de manière que la perte de tension soit sensiblement la même dans chacun d'eux pour le courant normal d'alimentation.

Les dynamos communiquent avec le commutateur par de larges barres de cuivre garnies d'une couche de ruban de coton. Le commutateur est relié aux feeders par des barres semblables, réunies en un point par un étau à vis. En cas d'accident grave à la canalisation, on peut supprimer brusquement cette connexion, en desserrant la vis de manière à provoquer la chute de l'étau. On ne conserve alors qu'une communication avec les théâtres, destinée à éviter la panique que produirait l'extinction des lampes. Cette mesure de précaution n'a, toutefois, pas encore trouvé son application.

Les fils pilotes, § 490, reviennent à un voltmètre commun, qui indique la tension moyenne dans le réseau et sur lequel l'agent préposé au service du tableau a constamment les yeux. Chaque machine possède un ampèremètre indiquant le courant fourni au rhéostat ou au réseau, ainsi qu'un voltmètre servant lors du réglage de la dynamo. Ce voltmètre est différentiel : l'un des circuits est relié au réseau, l'autre à la machine.

L'emploi des grandes machines permet de desservir une usine avec un personnel restreint. Lorsque la station de la Spandauerstrasse alimentera 40 000 lampes de 16 bougies, le personnel comprendra :

1 ingénieur,
1 électricien,
1 aide-électricien,
4 machinistes pour les moteurs,
4 machinistes pour les dynamos,
2 nettoyeurs pour les pompes d'alimentation,
1 chauffeur en chef,
6 chauffeurs.

On a constaté à Berlin que la durée moyenne d'allumage des lampes est de 700 heures par an. Le nombre maximum de lampes allumées simultanément n'y dépasse pas 70 pour 100 du nombre des lampes placées.

**744. — Usine de Kensington (Londres).** — L'usine électrique

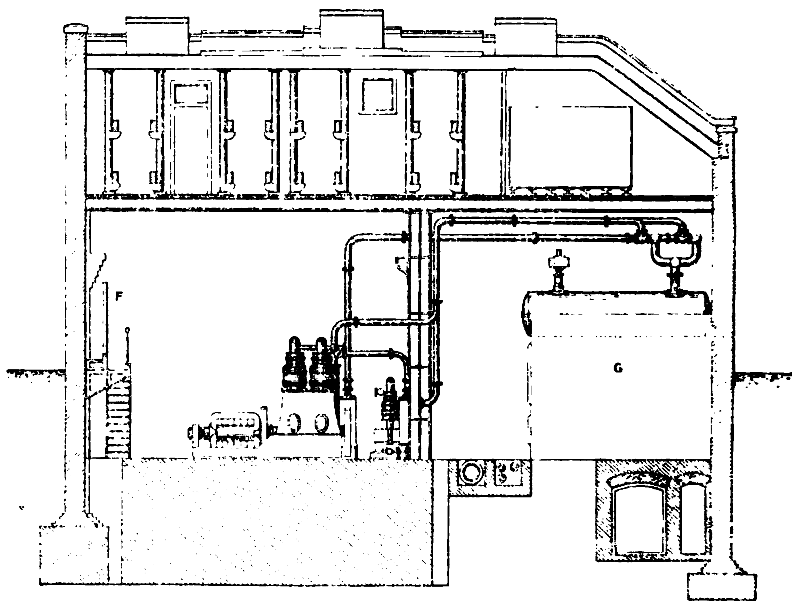



Fig. 496.

établie dans le district de Kensington, sous les auspices de M. Crompton, offre l'exemple d'un type d'installation compacte

très répandu à Londres où le terrain est particulièrement coûteux, fig. 496. La chambre de chauffe comporte des générateurs à vapeur G du type Babcock et Wilcox alimentant des dynamos à vapeur Willans-Crompton, de 200 chevaux, placées dans la halle des machines. La coupe montre que ces appareils sont disposés sur un bloc de fondation indépendant des murs voisins.

Une puissance de 750 chevaux est logée sur une surface de 225 m².

Le tableau de distribution est établi sur une galerie F. Au-dessus des machines existe une chambre d'accumulateurs, contenant des éléments Crompton-Howell employés pour venir en aide aux dynamos aux heures de forte consommation, et pour fournir le courant aux heures de nuit et de jour où les machines ne tournent pas. Ce système, recommandé par M. Crompton, permet une meilleure utilisation de l'installation mécanique, attendu que les machines marchent toujours dans de bonnes conditions de rendement ; il donne la faculté d'arrêter les machines pendant une grande partie de la journée et amène ainsi une notable économie de main-d'œuvre; il se prête aux accroissements subits de la consommation ; enfin, le prix des accumulateurs qu'il entraîne n'est pas excessif, eu égard au rôle secondaire joué par ceux-ci.

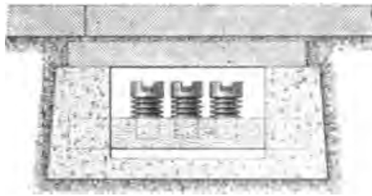


Fig. 497.

La distribution de Kensington se fait par le système à trois conducteurs. Ceux-ci sont des bandes de cuivre nu placées sur de grands isolateurs soutenus eux-mêmes par des traverses en bois dans des conduites de béton, fig. 497. Grâce à l'écartement des isolateurs, à la qualité de ceux-ci, aux soins avec lesquels sont faits les branchements vers les habitations et aux précautions employées pour le drainage, ce système, dont les imitations

ont donné ailleurs des résultats médiocres, fournit à Londres des résultats très satisfaisants. M Crompton estime que l'entretien annuel d'une telle conduite n'excède pas 1 à 2 pour 100 de son prix d'installation.

745. — **Station centrale de Genève.** — La ville de Genève présente un exemple d'utilisation d'une chute d'eau à la production de l'éclairage électrique. La station de cette ville est alimentée par

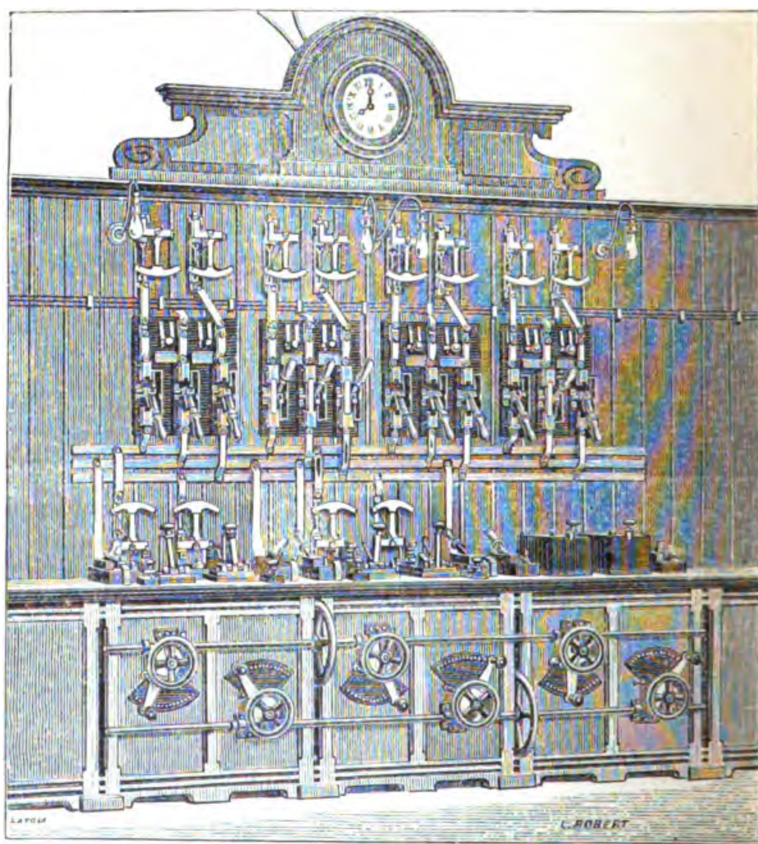


Fig. 498

une distribution d'eau sous une pression de 13,5 atmosphères obtenue par le barrage du Rhône. On a installé cinq turbines Girard de 200 chevaux, activant chacune deux dynamos Thury,

associées en série afin de distribuer l'énergie, par le système à trois conducteurs, sous une tension totale de 220 volts. Les câbles sont du système Siemens et Halske, de Berlin.

La fig. 498 montre une vue d'ensemble du tableau de distribution, pour trois groupes de dynamos. A la partie inférieure se trouvent les rhéostats servant à régler les champs magnétiques des machines. Des manivelles permettent d'ajuster ces rhéostats séparément. Au besoin, les axes des manivelles correspondant aux dynamos reliées en quantité peuvent être embrayés et manœuvrés par une manivelle unique.

Les groupes de dynamos communiquent avec trois grosses barres horizontales, au-dessus desquelles sont les interrupteurs qui permettent de relier les barres avec quatre faisceaux de feeders. Sous les barres de jonction sont figurés les ampèremètres servant à mesurer le débit des machines et les voltmètres.

**746. — Stations de Dieulefit et de Valréas.** — On compte, en France, un certain nombre d'installations municipales utilisant des chutes d'eau. L'une des plus intéressantes est celle qui alimente les deux villes de Dieulefit (Drôme) et de Valréas (Vaucluse), situées à 16 kilomètres l'une de l'autre, à l'aide d'une chute située à Béconne, à 5 kilomètres de la première ville et à 15 kilomètres de la seconde.

L'éclairage de chacune des villes est assuré par une turbine et une dynamo Ganz, à excitation indépendante, produisant 2 000 volts et 12 ampères. Une troisième dynamo-turbine sert de réserve.

La ligne la plus courte est formée d'un fil aérien en bronze, de 3,2 mm de diamètre, ayant 15 ohms de résistance pour le circuit double. La plus longue, également aérienne, comprend un câble de même résistance. Dans la campagne, ces lignes sont placées sur poteaux avec isolateurs en porcelaine à double cloche. Dans les villes, les fils primaires s'appuient sur le faîte des maisons et les transformateurs sont logés dans des boîtes en zinc portées sur des consoles fixées aux murs.

La fig. 499 donne le schéma des appareils servant à l'une des distributions. Afin de relever la tension utile aux extrémités des feeders, on emploie le dispositif différentiel décrit au § 497, qui sert également à alimenter les lampes de l'usine.

Le courant qui parcourt les feeders L L′ traverse le circuit primaire d'un transformateur E dont le secondaire, mis en tension avec le primaire du transformateur T, est dérivé par rapport aux bornes de la dynamo. Les connexions sont faites de manière que la force électromotrice secondaire de E soit de sens opposé à celle de l'alternateur et réduise la différence de potentiel agissant aux bornes primaires de T proportionnellement à la chute de tension dans les feeders. En graduant convenablement cette réduction par un rhéostat R‴, on arrive à obtenir à chaque instant aux bornes de T exactement la différence de potentiel aux extrémités des feeders. En effet, en désignant par V le voltage aux bornes de

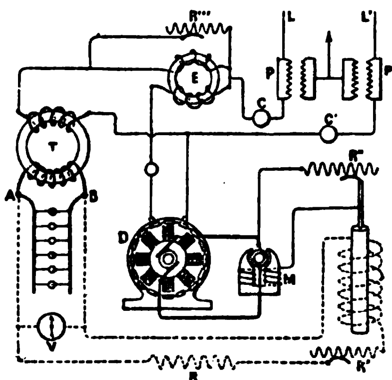



Fig. 499.

l'alternateur et par V′ la tension secondaire de E, la différence de potentiel aux bornes de T est V — V′; mais V′ est proportionnelle au courant I fourni par l'alternateur et traversant le primaire de E. En réglant convenablement la résistance R‴, on peut faire en sorte que le facteur de proportionnalité soit précisément égal à la résistance R des feeders. Par suite, la tension utile aux bornes de T sera V — IR comme aux bornes des transformateurs des abonnés et les lampes ainsi que le voltmètre reliés au secondaire de T seront soumis à la même différence de potentiel que les lampes des abonnés.

Le voltmètre V indique donc la tension des lampes du réseau et la disposition différentielle évite le placement onéreux de fils pilotes.

Aux bornes secondaires du transformateur T on a également relié un solénoïde régulateur dont on verra le détail au paragraphe suivant et qui a pour fonction d'introduire automatiquement des résistances dans le circuit des inducteurs de la machine excitatrice M, lorsque la tension utile augmente dans le réseau, et d'en retrancher au contraire, lorsque la tension diminue. En P sont les parafoudres à pointes servant à protéger les appareils de la station contre les décharges atmosphériques.

Dans la ville de Dieulefit, qui s'étend en longueur, on compte 6 transformateurs dérivés successivement sur la canalisation primaire. Afin d'éviter les différences de tension qui pourraient en résulter, les circuits induits des transformateurs sont réunis en dérivation. Par ce procédé, on égalise les tensions secondaires.

747. — **Usine électrique de Rome.** — La ville de Rome possède une usine à courants alternatifs installée par MM. Ganz et Cie pour le compte de la Société gazière de la ville et alimentant environ 2 400 lampes à incandescence de 16 bougies et 200 lampes à arc.

Le réseau s'étend jusqu'à une distance de 5 kilomètres de la station, laquelle est en dehors de la ville, près des ruines du Colisée et à proximité du Tibre.

La canalisation primaire est formée de câbles concentriques, système Siemens et Halske, enfouis dans une conduite souterraine en bois remplie de ciment. Des feeders partent de l'usine dans les principales directions et alimentent en dérivation des transformateurs d'une puissance uniforme de 10 chevaux. La tension primaire de 2 000 volts est réduite à 110 volts dans les circuits secondaires. Lorsque ceux-ci comportent des lampes à arc, on emploie un conducteur intermédiaire de manière à obtenir 55 volts aux bornes des lampes mises en série avec des bobines à réaction servant de résistances additionnelles.

L'usine ne présente qu'un étage et contient de grandes dynamos de 320 kilowatts (2 000 volts et 160 ampères), attaquées directement par des machines Van den Kerchove marchant à 125 tours, et pourvues d'excitatrices spéciales à courant continu activées par des moteurs Westinghouse à grande vitesse.

La fig. 500 montre la disposition de ces dynamos à courant

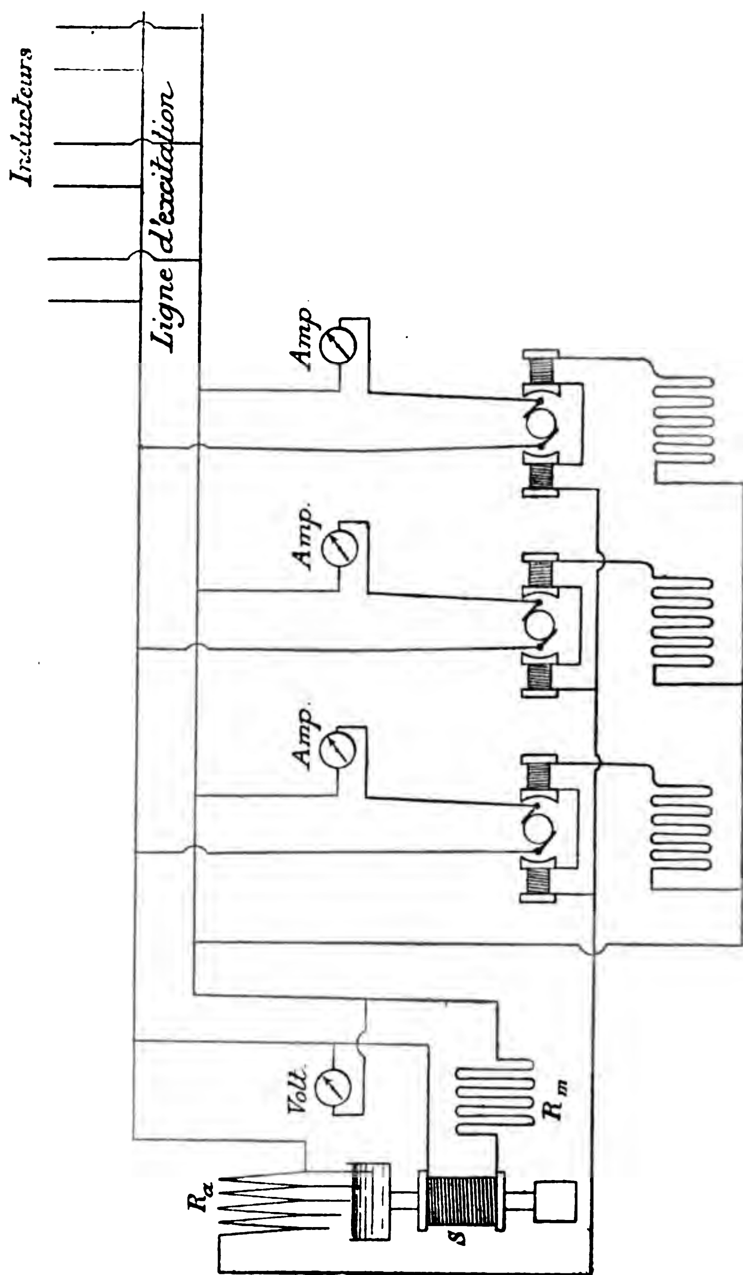



Fig. 500.

continu, réunies en parallèle par rapport à la ligne d'excitation, sur laquelle se branchent les inducteurs des alternateurs. Chaque machine excitatrice possède un rhéostat à main servant à régler le champ de ses inducteurs. En outre, un régulateur automatique à mercure permet de modifier l'excitation de l'ensemble des machines continues. Dans ce but, un solénoïde S, mis en dérivation sur la ligne d'excitation et traversé par un courant réglé à l'aide de la résistance $R_m$, attire un noyau équilibré par un flotteur inférieur plongeant dans un vase contenant de l'eau. A la partie supérieure du noyau se trouve une cuvette remplie de mercure dans lequel baignent des fils de longueurs variables reliés à des résistances intercalées dans le circuit des inducteurs des machines excitatrices. Si la différence de potentiel diminue dans la ligne d'excitation par suite de l'addition d'un alternateur, le noyau est attiré avec moins de force et la cuvette remonte ; le mercure met un certain nombre de résistances en court-circuit et l'excitation des machines continues est accrue. Quand l'appareil automatique est arrivé au bout de sa course, on le ramène en arrière au moyen des rhéostats de réglage à main.

Le tableau de distribution, fig. 501 et 502, mesure 2,40 m de hauteur sur 5 m de largeur. Il porte un certain nombre de barres doubles horizontales 1, 2, 3, 4, 5, 6, isolées sur des rondelles en porcelaine et reliées aux couples de feeders quittant la station. De ces barres descendent des tiges verticales qu'on voit dans les élévations de face et de côté.

Le commutateur comporte autant de sections semblables à celle figurée qu'il y a d'alternateurs. Dans chaque section, deux barres marquées par les signes + et — sont connectées aux pôles d'un des alternateurs et supportent des tiges verticales descendant à la même hauteur que les tiges des feeders. Pour faire communiquer une des paires de feeders avec une des dynamos, il suffit de relever, à l'aide d'une manivelle B, une paire de godets à mercure C. La fig. 501 montre trois couples de feeders ainsi reliés. Le but des transmissions A B E H est de permettre d'embrayer les mouvements des divers godets, de telle sorte que, par le déplacement de la manivelle L, on puisse connecter un ou plusieurs alternateurs avec les feeders, en même temps qu'on rompt la communication de ceux-ci avec d'autres dynamos.

L'observation de la tension dans le réseau se fait à l'aide du réducteur différentiel décrit au paragraphe précédent.

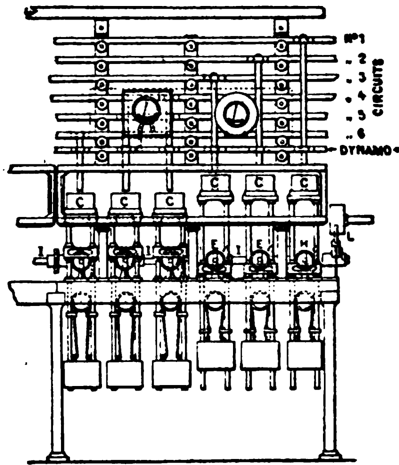



Fig. 501.

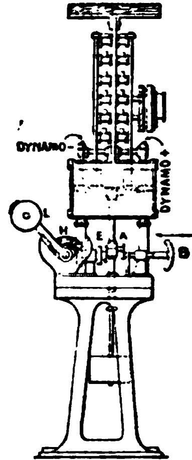



Fig. 502.

Les alternateurs sont associés en dérivation à mesure que la demande s'accroît. Avant d'ajouter un alternateur, on commence par le faire fonctionner sur des lampes ou des résistances disposées à l'usine et capables d'absorber sa puissance totale, l'induit tournant à sa vitesse normale. On relie cet induit au primaire d'un transformateur voisin d'un second transformateur communiquant avec le réseau. Les secondaires de ces deux transformateurs sont mis en opposition dans un circuit contenant une couple de lampes. Selon que les phases de l'alternateur coïncident avec celles du réseau ou leur sont opposées, les lampes s'éteignent ou s'allument. On constate des périodes plus ou moins longues pendant lesquelles l'éclat des lampes témoins diminue jusqu'à l'extinction et remonte ensuite. On saisit le moment d'une extinction pour réunir l'alternateur au réseau. On retire alors graduellement les résistances auxiliaires reliées aux bornes de la machine.

Le service commence à une heure de relevée en hiver et à trois heures en été. Avant de mettre la première dynamo en marche, on la règle sur le grand rhéostat capable d'absorber toute sa puissance. Un ampèremètre Hummel marque l'intensité du courant et

un voltmètre Cardew, relié au réducteur de la machine, indique la différence de potentiel. Lorsque la demande approche du débit maximum du premier alternateur, un second alternateur est réglé de la même manière que le premier et réuni en parallèle avec celui-ci au moment où l'indicateur de phases montre que les machines marchent en cadence.

Quand un théâtre ou un magasin utilise un nombre de lampes très considérable, il prévient l'usine par téléphone dix minutes avant l'allumage, de manière qu'on ait le temps de préparer un des alternateurs pour l'ajouter en parallèle.

La maison Ganz emploie des alternateurs ne produisant que 42 périodes par seconde. Ce degré de fréquence facilite le couplage en dérivation des machines et permet d'alimenter de petits moteurs tétrapolaires ne faisant que 1 250 tours par minute, alors que, si la frequence était plus grande, il faudrait ou multiplier beaucoup les pôles, ce qui rendrait le moteur coûteux, ou adopter des vitesses angulaires exagérées.

Depuis 1892, la distribution électrique de Rome est alimentée par une partie de la puissance hydraulique des célèbres chutes de Tivoli, situées à 28 kilomètres de la capitale italienne. Six turbines de 330 chevaux actionnent des alternateurs à 5020 volts ; trois turbines de 50 chevaux font tourner les excitatrices. La ligne aérienne, traversant la campagne de Rome, comporte 4 câbles de cuivre de 100 $mm^2$ et donnant lieu à une chute de potentiel maxima de 1020 volts, soit 20 pour 100 de la tension totale. Les poteaux sont métalliques et écartés de 35 à 40 m. Le câble inférieur est à 7 m du sol. Les isolateurs sont à réservoir d'huile. A l'entrée dans Rome, une sous-station de transformateurs ramène la tension de 4000 à 2000 volts, valeur adoptée dans le réseau primaire.

Depuis l'installation de ce transport d'énergie, on ne met en marche l'usine à vapeur décrite plus haut que lorsque la puissance hydraulique est insuffisante pour les besoins.

Il est à remarquer qu'on éclaire les rues au moyen de lampes à arc, mises en série et reliées directement à la distribution à 2000 volts. Les lignes correspondantes sont aériennes.

**748. — Usine électrique de Cologne.** — La fig. 503 montre une coupe à travers l'usine électrique de Cologne exploitée en régie par la municipalité et établie par la firme Helios, d'Ehrenfeld, suivant les derniers perfectionnements du système Ganz. L'usine est située à la limite de la ville. La chambre de chauffe est pourvue

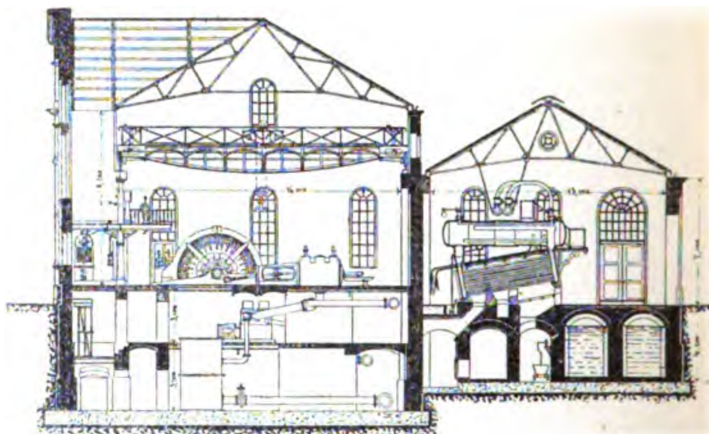


Fig. 503.

de chaudières Steinmüller multitubulaires, de 21 m² de surface de chauffe, dont le tirage est activé par un ventilateur. Dans le sous-sol de la chambre, on voit les carneaux de fumée, une galerie d'évacuation des cendres et des réservoirs capables de contenir 500 m³ d'eau.

La halle des machines, au-dessus de laquelle règne un pont roulant avec grue de 30 tonnes, contient 3 machines Sulzer compound, fournissant 500 à 600 chevaux à 85 tours par minute, et une quatrième machine plus petite pour les heures de faible débit. Le volant des grandes machines est remplacé par un inducteur de 4,30 m de diamètre comportant 72 pôles rayonnants. L'induit formé de deux demi-couronnes, pouvant être déplacées pour la visite de la dynamo, présente 72 bobines où se développent des courants alternatifs à la tension de 2 000 à 2 500 volts et d'une fréquence égale à 51 périodes par seconde.

La vapeur est amenée aux moteurs par deux conduites en fer forgé. Des condenseurs situés sous les moteurs reçoivent l'eau froide des réservoirs susmentionnés et refoulent l'eau chaude dans ces mêmes réservoirs.

Un caractère particulier de l'usine est l'absence, à proprement parler, de tableau de distribution. Les appareils régulateurs et interrupteurs sont dissimulés et manœuvrés par des leviers situés

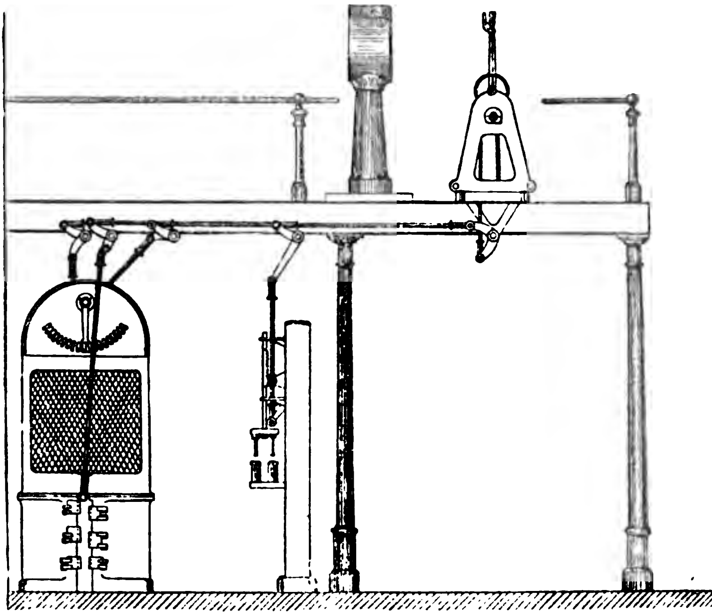


Fig. 504.

sur une plateforme élevée à 3 m au-dessus du sol de la halle des machines. Ainsi, on évite le danger auquel exposerait le contact des instruments de service soumis à une haute tension.

La fig. 504 montre l'ensemble de cette disposition, tandis que la fig. 505 présente une vue détaillée des leviers. A chaque alternateur sont affectés 4 leviers *a*, *b*, *c*, *d* derrière lesquels s'élève une colonne portant les appareils de mesure correspondants, à savoir : les ampèremètres et les voltmètres pour l'alternateur et son excitatrice et l'indicateur de phases pour le couplage de l'alternateur.

Pour mettre un alternateur en service, on commence par fermer le circuit de l'excitatrice par le levier *d*, après quoi, avec le levier *c*, on règle les résistances introduites dans les inducteurs de cette machine. On relie ensuite, au moyen du levier *a*, l'induit de l'alternateur à des résistances artificielles placées dans la cave et capables d'absorber la puissance entière de la machine. Lorsque l'indicateur de phases montre que l'alternateur est en accord avec les phases de

la distribution, on relie la machine au réseau à l'aide du levier *b* qui agit sur un interrupteur à mercure qu'on voit sur la fig. 504 et qui est analogue à celui de l'usine de Rome.

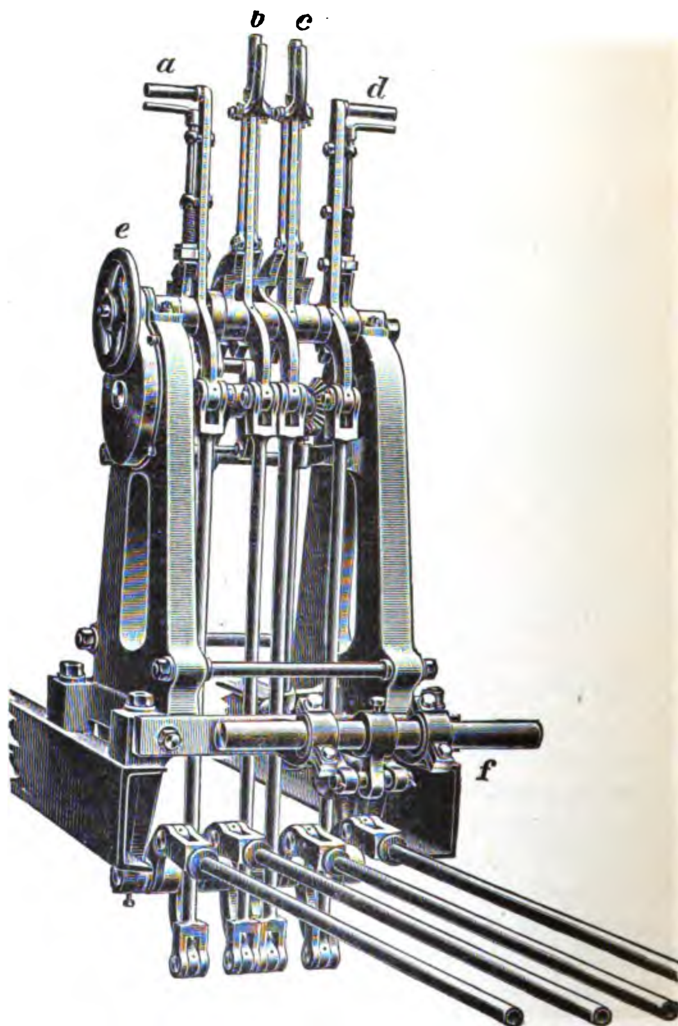



Fig. 505.

Le réseau actuel, capable de desservir 20 000 lampes, comporte environ 20 kilomètres de conducteurs. Ceux-ci sont souterrains ; ils se composent de câbles concentriques sous plomb, armés de bandes en fer suivant le système Berthoud, Borel et Cie. Ces câbles

sont posés dans des boîtes en bois remplies d'asphalte. Afin de permettre les travaux à la canalisation sans arrêter la distribution entière, on a prévu le moyen d'isoler par sections les conducteurs.

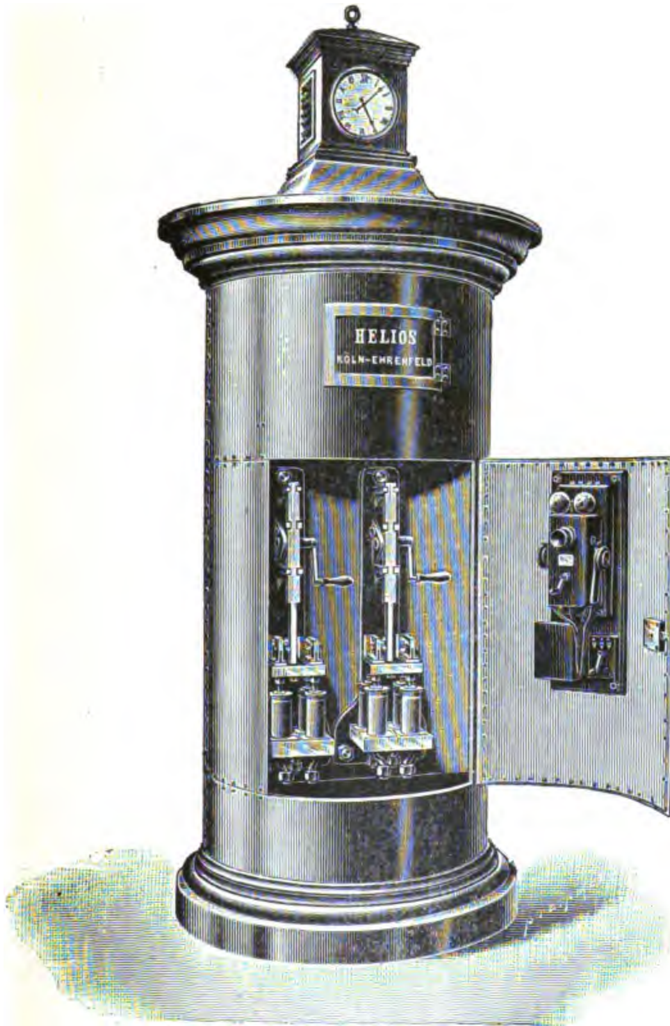



Fig. 506.

Dans ce but, on a installé des interrupteurs à mercure logés dans des armoires disposées dans les édifices publics ou dans des colonnes en fer telles que celle représentée dans la fig. 506. A l'intérieur se trouve un téléphone en relation avec l'usine.

La fig. 507 montre un branchement d'abonné. D'une boîte de jonction part un câble double aboutissant à un interrupteur. De là, des câbles simples posés sur isolateurs se rendent au transformateur. Le circuit secondaire de ce dernier traverse un compteur.

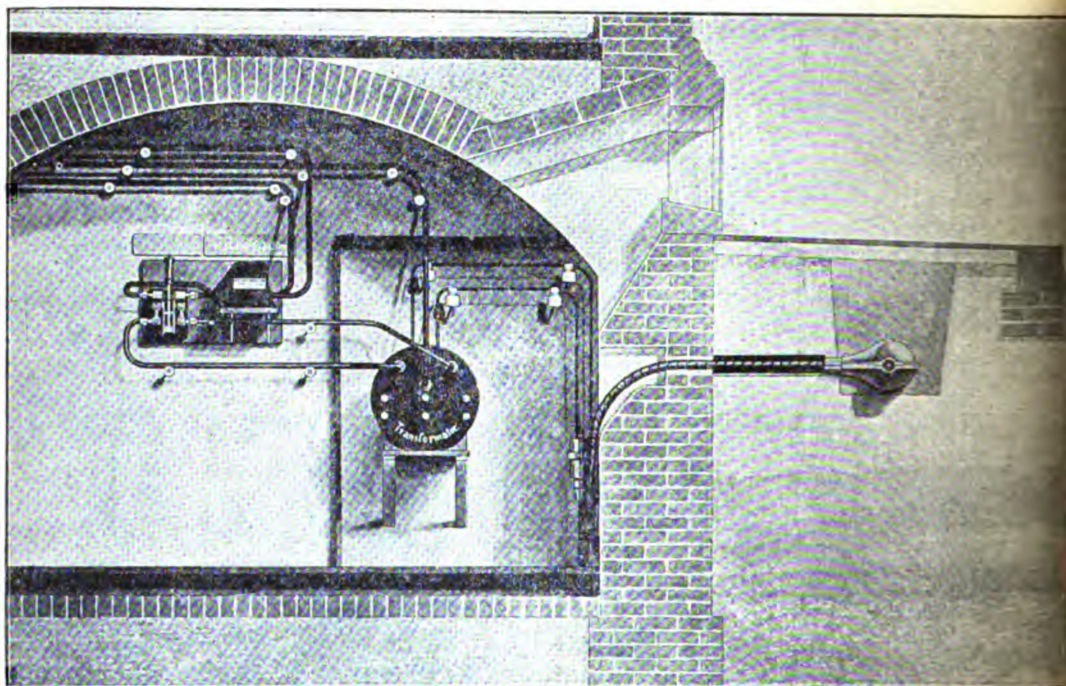


Fig. 507.

Les dépenses d'installation de la distribution électrique se répartissent comme suit :

| | | |
|---|---|---|
| Bâtiments et terrains. . . . . . . . . . . | fr. | 456 250 |
| Chaudières. . . . . . . . . . . . . . . . | » | 162 500 |
| Moteurs, dynamos et appareils électriques de l'usine. . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 806 250 |
| Conducteurs et transformateurs. . . . . . | » | 775 000 |
| Compteurs . . . . . . . . . . . . . . . | » | 50 000 |
| Divers . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 62 500 |
| | Fr. | 2 312 500 |

L'énergie est vendue à raison de 0,80 fr. le kilowatt-heure, avec

des rabais, allant jusque 50 pour 100, pour une consommation croissante.

749. — **Distribution Westinghouse.** — La maison Westinghouse a contribué dans une large mesure au développement considérable pris par les distributions par transformateurs aux États-Unis. Nous avons eu l'occasion de décrire l'alternateur et le transformateur, §§ 432 et 457, que cette maison construit. Nous examinerons les caractères principaux des procédés de distribution qu'elle préconise.

Pour l'éclairage privé qui utilise surtout les lampes à incandescence, M. Westinghouse alimente les transformateurs en dérivation sous une tension d'un millier de volts, réduite dans les circuits secondaires à 50 volts. Ce voltage est considéré aux États-Unis comme favorable à l'obtention de lampes à incandescence solides et de longue durée.

Les canalisations sont généralement aériennes dans les villes américaines et les poteaux qui supportent les fils soutiennent parfois le transformateur destiné à desservir un immeuble voisin, comme l'indique la fig. 508.

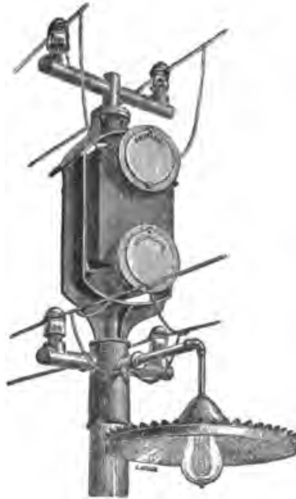


Fig. 508.

Lorsqu'on fait ainsi usage de conducteurs aériens, il est nécessaire de munir les transformateurs non seulement d'un coupe-circuit

double sur le primaire et d'un appareil de sûreté prévenant tout contact entre le primaire et le secondaire, § 499, mais encore d'un parafoudre préservant l'appareil en cas de décharges atmosphériques. L'ingénieuse disposition de M. E. Thomson, § 478, dans laquelle un électro-aimant traversé par le courant de la dynamo éloigne l'arc produit par celle-ci entre les plaques de sûreté et le rompt, pourra être mise à profit. Les transformateurs américains se disposent également contre les murs, extérieurement aux immeubles desservis.

Les alternateurs Westinghouse sont susceptibles d'être associés en quantité. Toutefois, la pratique américaine ne semble pas favorable à ce mode de groupement qui suppose tous les récepteurs reliés par un réseau commun. La facilité avec laquelle il se produit des terres dans un réseau à haute tension, dont l'isolement n'est pas très soigné, engage à diviser les récepteurs en groupes isolés communiquant par des feeders avec les alternateurs. De cette manière, si des pertes à terre surviennent aux deux bornes primaires d'un transformateur, on isole le feeder correspondant à l'usine et il n'y a qu'un nombre restreint d'appareils hors service.

A la station génératrice, on dispose des commutateurs permettant de connecter un feeder ou un faisceau de feeders avec chacun des alternateurs. Aux heures où la demande de courant est faible, une seule dynamo suffit pour alimenter tous les feeders. A mesure que les lampes sont allumées, on sépare les feeders en les reliant isolément ou par groupes à des alternateurs indépendants. Par ce moyen, on fait en sorte que chaque machine fonctionne avec le meilleur rendement, tout en assurant l'indépendance des groupes de transformateurs. On règle la tension dans le réseau à l'aide d'un voltmètre Cardew dérivé sur le secondaire d'un transformateur dont le primaire communique avec des fils pilotes, ou encore à l'aide de la disposition différentielle de MM. Ganz et Cie.

On peut mettre les feeders en contact avec un indicateur de terre dont le principe est analogue à celui du dispositif du § 554. Un transformateur dont une des bornes primaires est unie au sol peut être mis en communication par la seconde borne primaire avec l'un ou l'autre des conducteurs du circuit essayé. Une lampe placée sur le secondaire brûle avec un éclat plus ou moins vif lorsqu'il existe une terre dans le réseau.

Toutes les clefs insérées dans les circuits à haute tension doivent être doubles, c'est à dire qu'il faut qu'elles interrompent à la fois les deux conducteurs de chaque circuit, afin de ne pas laisser persister dans l'un d'eux une tension qui peut être dangereuse.

750. — **Station de Sardinia Street, à Londres.** — Les principes de la distribution Westinghouse ont été appliqués à la station électrique de Sardinia Street, située dans un des quartiers riches de Londres [1], et au sujet de laquelle nous donnerons quelques détails en raison du soin qui a été apporté par les ingénieurs de la Metropolitan Electric Light C° dans l'étude de cette usine.

Les moteurs à vapeur sont établis au rez-de-chaussée sur des fondations en maçonnerie reposant sur une couche de feutre recouverte de plomb et appuyant elle-même sur un massif de béton. L'ensemble de ces fondations est isolé dans une excavation à parois maçonnées, de 4 m de profondeur. On évite, par ce moyen, que les trépidations des machines ne se communiquent aux habitations voisines. En outre, les murs de l'usine sont doubles afin d'empêcher la propagation des bruits de celle ci. Les dynamos sont situées au premier étage et attaquées par des courroies traversant le plancher.

Dix moteurs compound du système Westinghouse, produisant 250 chevaux à 200 tours par minute, commandent chacun un alternateur. Trois excitatrices à courant continu sont attaquées par des moteurs distincts.

Les chaudières se trouvent dans une halle latérale, située, de même que le magasin à charbon, en contrebas de la rue, afin de pouvoir vider le combustible par des soupiraux ouvrant à la rue.

Sur un des côtés de la salle des dynamos se trouve un immense tableau de distribution, de 18 m de longueur et 4 m de hauteur, permettant d'effectuer les combinaisons suivantes entre les 3 excitatrices, les 10 alternateurs et les 20 feeders transportant l'énergie électrique de l'usine à 20 groupes distincts de transformateurs éparpillés dans le district desservi par l'usine.

1° Une des excitatrices doit pouvoir être reliée à un groupe quelconque d'alternateurs.

---

[1] FLEMING, *Electrician*, 24 octobre 1890.

2° Il faut qu'un feeder ou un faisceau de feeders puisse s'embrancher avec un alternateur quelconque ou, exceptionnellement, avec un groupe d'alternateurs associés en quantité.

3° Un alternateur de réserve doit pouvoir remplacer rapidement une machine défectueuse.

Le tableau est formé de panneaux en ardoise emboîtés dans une charpente métallique. Il est suffisamment écarté du mur pour qu'un ouvrier puisse faire aisément les connexions à l'arrière entre les conducteurs et les appareils de commutation.

A chaque feeder correspond un panneau à la tête duquel se trouvent un ampèremètre, un voltmètre marquant la tension au départ et un autre voltmètre permettant d'estimer la tension aux récepteurs, grâce à la disposition différentielle déjà décrite. Chaque panneau porte également des résistances artificielles servant à régler séparément le voltage utile de chaque feeder, lorsqu'un même alternateur alimente plusieurs circuits.

Le voltage d'un faisceau de feeders peut être relevé ou abaissé par l'introduction de résistances dans le circuit dérivé d'une des excitatrices.

Le commutateur des excitatrices est situé au centre du tableau, en un point d'où l'on domine l'ensemble des dynamos.

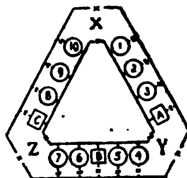



Fig. 509.

Les cercles marqués de 1 à 10 figurent les inducteurs des alternateurs qui, à l'aide de clefs d'interruption, peuvent être intercalés en dérivation par rapport à un des couples de conducteurs entre lesquels sont branchés les trois excitatrices A, B, C. Trois clefs doubles X, Y, Z permettent de fermer les triangles formés par les conducteurs. En manœuvrant les clefs des alternateurs et les trois doubles clefs, on peut former un grand nombre de combinaisons entre les excitatrices et les alternateurs.

Au panneau correspondant à un feeder se trouve un commuateur à l'aide duquel il est possible de relier cette artère à un

alternateur ou à un groupe d'alternateurs, en même temps que de substituer rapidement un alternateur à un autre. La fig. 510 montre le principe de la disposition appliquée au cas de 3 alternateurs n° 1, n° 2 et n° 3. Ceux-ci communiquent par des conducteurs 1, 2, 3, 1', 2', 3' avec des blocs de laiton *a*, *b*, *c*, *a'*, *b'*, *c'* disposés entre deux rangées de barres *h*, *g*, *h'*, *g'*. Des chevilles métalliques permettent de relier les blocs aux barres. Ces dernières sont raccordées, d'autre part, à un commutateur central qui a pour organe principal un levier double dont les branches communiquent avec les deux conducteurs 4, 4 constituant le feeder. Si l'on pousse le double levier vers le haut, on voit qu'on peut faire communiquer F, F' avec G, G'. Si le levier est poussé vers le bas, c'est avec H, H' que la liaison s'établit. Enfin, dans une position intermédiaire, le levier relie F, F' à la fois avec G, G' et avec H, H'. Cela compris, pour connecter l'alternateur n° 1 avec le feeder, on mettra des chevilles entre les blocs *a*, *a'* et les barres *g*, *g'* et l'on relèvera la double clef.

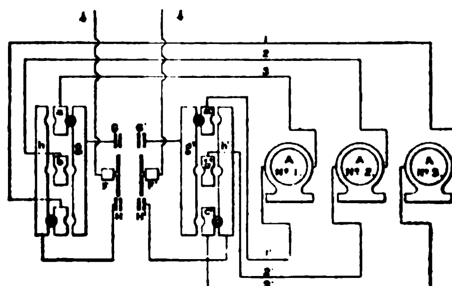


Fig. 510.

Pendant ce temps, on fera tourner une dynamo de secours n° 3, par exemple, à vide et à faible vitesse et l'on insérera des chevilles entre *c*, *c'* et *h*, *h'*. Si l'alternateur n° 1 vient à manquer, l'agent préposé à la manœuvre du commutateur demandera au conducteur des machines de donner au n° 3 une allure normale. Il suffira alors d'abaisser brusquement le double levier pour opérer la transposition sans qu'on aperçoive d'oscillation du courant dans le feeder. On pourrait associer le n° 1 et le n° 2 en quantité, après les avoir réglés à l'aide d'un synchroniseur de phases, en plaçant des chevilles entre *b*, *b'* et *g*, *g'*.

Comme il y a dix alternateurs dans la station de Sardinia Street,

il faut 20 panneaux contenant chacun dix paires de blocs tels que *a a'*. On pourra ainsi grouper les feeders et les alternateurs de toutes les manières possibles.

Les conducteurs du réseau sont souterrains. Ce sont des câbles isolés au caoutchouc et tirés dans des conduites en fonte.

La fig. 511 montre un feeder arrivant à une boîte de distribution *e* où il se raccorde par l'intermédiaire de fils fusibles avec des conducteurs alimentant des groupes de transformateurs *a*, *b*, *c*, *h* et *d*, *m*, *n* disposés sur des circuits fermés en vue de permettre au courant d'arriver par deux côtés à ces appareils et de diminuer ainsi les chances d'arrêt de ceux-ci. Les conducteurs sont figurés par un trait unique pour simplifier le dessin. Le détail *h* montre qu'en avant d'un transformateur se trouve un coupe-circuit primaire qui est double.

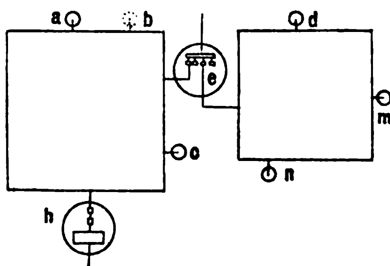



Fig. 511.

Devant chaque maison d'abonné la conduite présente un raccord en T par lequel on tire les bouts de câble allant vers le transformateur, afin de supprimer les joints au point de branchement. Si un nouvel abonné *m* demande un raccordement, on enlève le câble entier situé entre *d* et *n* et l'on tire deux bouts de câble nouveaux *dm*, *mn* pour éviter le joint. Le câble retiré est remisé jusqu'au moment du réemploi.

## APPLICATIONS DIVERSES.

751. — **Éclairage public des villes.** — Les lampes de faible intensité, employées habituellement pour l'éclairage des rues et des places publiques, n'éclairent qu'un périmètre très restreint et laissent le haut des maisons dans une obscurité presque complète. Pour l'éclairage des artères principales d'une ville, rien ne

remplace la puissante lumière de l'arc voltaïque, qui produit l'effet d'un beau clair de lune et fait valoir l'architecture des maisons jusque dans les moindres détails.

Les lampes à arc doivent se placer à une hauteur suffisante pour ne pas gêner la vue par l'éclat direct du foyer. Les globes opalins corrigent du reste la crudité de la lumière directe. Les hauteurs de 8 à 20 m sont les plus courantes. Aux États-Unis, on a adopté dans certaines villes des mâts en treillis beaucoup plus élevés. Mais les lampes éclairent alors inutilement les faîtes des maisons, et l'entretien des foyers est rendu très difficile.

Les lampes peuvent être portées par des poteaux métalliques, disposés sur les trottoirs ; parfois elles sont suspendues au milieu des rues par des chaînes tendues entre deux poteaux ou entre deux maisons opposées. La fig. 512 montre la disposition adoptée dans l'avenue des Tilleuls, à Berlin.

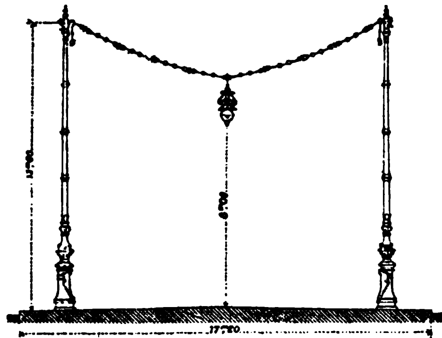


Fig. 512.

Lorsque les lampes sont portées par des poteaux, divers moyens sont en usage pour faciliter le renouvellement des charbons. Les lampes peuvent, par exemple, être descendues par un treuil fixé au bas du support et à l'aide de câbles passant sur des poulies à la partie supérieure. Lorsque la lampe est remise en place, elle vient butter à frottement contre des contacts métalliques reliés à la canalisation.

Généralement, on évite ces contacts mobiles en descendant, avec la lampe, des câbles conducteurs flexibles, mais ce procédé expose ceux-ci à une usure rapide.

M. Jaspar emploie des mâts basculant autour d'un axe situé au

tiers de la hauteur. Un contrepoids équilibre la partie supérieure du mât et la lampe pendant le mouvement.

Il convient que les câbles électriques et les câbles de support soient logés à l'intérieur des mâts dans les parties accessibles, afin d'être soustraits à la malveillance.

Les lampes à arc destinées à l'éclairage des rues sont fréquemment alimentées en série par des dynamos à haute tension, afin de permettre l'emploi de conducteurs de faible section. On recommande, dans ce cas, de disposer les lampes alternativement sur deux circuits, de sorte que, si un accident survient à l'un d'eux, la rue reste éclairée par la moitié des foyers.

Les machines à courant constant, des systèmes Brush et Thomson-Houston, §§ 410 et 411, sont spécialement affectées à l'alimentation en série des lampes. Ces dernières sont pourvues de veilleurs automatiques qui les mettent en court-circuit lors d'un accident aux charbons, § 719.

Récemment, la Compagnie Westinghouse a utilisé la distribution par transformateurs en série pour l'éclairage des rues par l'arc voltaïque. Un alternateur développant un courant constant alimente les circuits primaires de transformateurs disposés en tension ; on a vu, § 494, que, dans ces conditions, les courants secondaires restent également invariables. Les circuits secondaires reçoivent une ou plusieurs lampes, suivant les dimensions des transformateurs. De cette manière, on évite les potentiels élevés aux bornes des foyers tout en permettant de faire usage de conducteurs d'alimentation de faible section. Lorsqu'on éteint une lampe, on doit la mettre en court-circuit. La dépense d'énergie est alors négligeable dans le circuit secondaire, vu la faible résistance de ce dernier, et, par suite, la puissance absorbée par l'enroulement primaire devient très minime.

Les lampes peuvent être employées sans résistances additionnelles ni bobines à réaction, puisque le contact accidentel des charbons n'accroît pas sensiblement le courant qui les traverse. La Compagnie Westinghouse a abaissé la fréquence du courant de 130 à 62 dans cette application. Le ronflement des lampes à arc baisse ainsi d'une octave, et la force contre-électromotrice développée dans les électro-aimants des lampes est diminuée de moitié, ce qui permet de réduire ces appareils.

L'alternateur Stanley qui alimente les transformateurs jouit de

la propriété de donner un courant constant sans réglage spécial. Sa réaction d'induit est telle que les variations de la force électromotrice et de l'angle de phase maintiennent l'intensité du courant à sa valeur normale, quelle que soit la résistance extérieure.

Dans des villes disposant de distributions d'eau à haute pression, M. Dulait, de Charleroi, a installé des lampes à arc de grande puissance lumineuse portées par des mâts élevés, dans le socle desquels se trouvent une petite turbine et une dynamo, fig. 513. Cette solution, d'une application toute spéciale, évite les canalisations électriques.

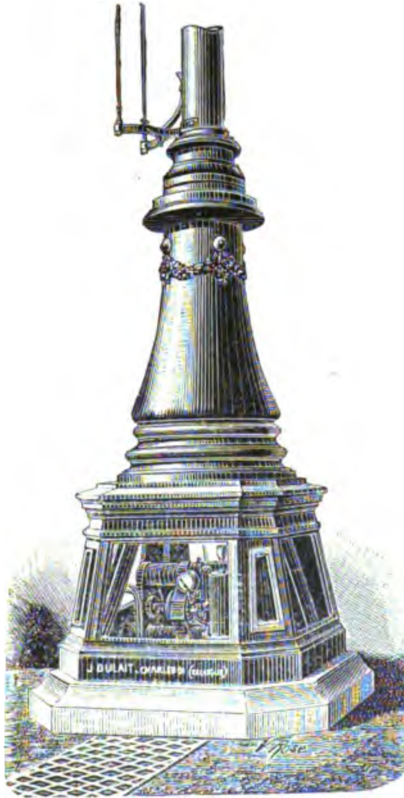



Fig. 513.

Le rendement des lampes à incandescence n'étant guère que le cinquième de celui des foyers à arc voltaïque, les premières ne

conviennent pas pour l'éclairage des grands espaces. Mais, dans les rues secondaires, dont la largeur ne permet pas de mettre à profit la lumière d'une lampe à arc et où l'on ne demande qu'un éclairement moyen minime, on pourra adopter les foyers à incandescence.

C'est ce que fait la Compagnie Edison, aux États-Unis, dans les petites villes. Pour cette application, elle emploie ordinairement la distribution en série sous une tension qui s'élève, aux pôles de la machine, à 500 ou 600 volts. Le courant est maintenu constant par un mécanisme automatique agissant sur l'excitation. Les lampes, à faible différence de potentiel et à gros filament, possèdent, comme les lampes Bernstein, § 704, un dispositif de sûreté qui met les fils d'alimentation en court-circuit quand le charbon vient à se briser, ainsi que lorsqu'on enlève la lampe de son support.

Une solution simple et économique a été donnée par M. Westinghouse à l'alimentation des lampes à incandescence destinées à l'éclairage des voies publiques. Des lampes sont disposées en série entre les deux conducteurs primaires des distributions destinées à l'éclairage privé par transformateurs, § 704. Aux bornes de chaque lampe se place en dérivation une bobine à réaction qui n'absorbe qu'un courant négligeable tant que la lampe voisine est en activité, mais qui est traversée par le courant de circulation entier aussitôt que le filament vient à se briser, et qui assure de la sorte la continuité du courant dans les autres lampes de la série.

Lorsqu'on adopte la distribution à cinq fils, § 487, les lampes à arc ou les lampes à incandescence servant à l'éclairage public peuvent être disposées en série entre les conducteurs extrêmes.

752. — **Éclairage des gares et des usines.** — Les grands espaces couverts ou découverts que presentent les gares et les usines s'éclairent fort bien avec les lampes à arc. Celles-ci permettent d'obtenir à peu de frais des foyers qui, placés à une hauteur suffisante, réduisent les ombres portées et permettent au personnel de travailler avec la même sécurité qu'à la lumière du jour. En outre, le bon éclairage des chantiers améliore le travail des ouvriers et facilite leur surveillance, ce qui permet de réaliser une économie sérieuse dans les frais d'exploitation.

C'est à ces titres que les Congrès tenus par les ingénieurs des chemins de fer à Milan (1885) et à Paris (1889) ont recommandé

tout spécialement l'éclairage électrique dans les gares. Les lampes à arc employées doivent être placées assez haut, non seulement pour assurer une bonne répartition de la lumière, mais aussi pour ne pas gêner la vue des signaux optiques. En Belgique, on a essayé des mâts mesurant jusque 32 m d'élévation, mais l'expérience a montré que la hauteur de 16 m est une bonne limite pratique dans les régions basses du pays, où les brouillards sont fréquents et absorbent une fraction de la lumière d'autant plus grande que les foyers sont plus élevés.

Les lampes à arc, devant brûler pendant les plus longues nuits, sont pourvues de charbons simples ou doubles suffisants pour un éclairage de 16 heures.

Lorsque les foyers sont placés dans des halles couvertes ou dans des salles d'usine, on accroît l'effet des lampes en blanchissant les murs et les plafonds à la chaux.

Dans les cas où une grande uniformité est nécessaire dans l'éclairement, on s'est bien trouvé du système d'éclairage par réflexion. Ce système, qui convient aux foyers puissants, tels que les lampes à arc, consiste à disposer la lampe, le crayon positif en dessous, dans une lanterne fermée inférieurement et latéralement par des réflecteurs qui renvoient toute la lumière sur un écran blanc ou sur un plafond plat blanchi. Les rayons sont alors diffusés dans toutes les directions et procurent une lumière douce et égale qui supprime toute ombre portée. Le bureau principal des télégraphes de Bruxelles a été éclairé à l'aide de ce procédé par M. Jaspar, dès l'année 1879. Ce système est également appliqué avec succès dans les filatures.

Les gares et les usines trouvent généralement avantage à produire elles-mêmes l'énergie électrique qu'elles consomment. Autant que possible, il convient d'activer les dynamos par des moteurs spéciaux en vue d'assurer la fixité de la lumière. Cependant, lorsqu'un des moteurs de l'usine possède une allure suffisamment constante, il peut y avoir économie à l'utiliser pour la conduite des machines électriques. Un moteur irrégulier est susceptible d'être employé à la condition de régulariser le courant des dynamos par des accumulateurs en dérivation sur le circuit des lampes, § 505.

Dans beaucoup d'installations industrielles, on alimente les lampes à arc en dérivation par des conducteurs partant de l'usine vers chaque foyer, afin d'assurer l'indépendance de ces appareils et de permettre de les allumer et de les éteindre d'un seul point. La résistance de ces conducteurs est alors calculée de manière à ce qu'ils tiennent lieu, autant que possible, des résistances artificielles exigées par les arcs en dérivation. On emploie même, dans ces occasions, des conducteurs en fer étamé ou galvanisé, dans les endroits à l'abri de la pluie. On dispose, au tableau de distribution, dans chaque circuit, un avertisseur d'extinction formé d'un électro-aimant traversé par le courant et dont l'armature dégage un voyant lorsqu'elle est attirée. Cette précaution permet au mécanicien de juger d'un coup d'œil de l'état des foyers. Le système a l'inconvénient d'exiger un grand développement de conducteurs. On peut économiser ceux-ci en groupant 6 à 12 foyers en série, diverses séries étant réunies en dérivation sur les conduites d'alimentation.

753. — **Éclairage des théâtres, cafés et magasins. Éclairage de blocs de maisons.** — L'éclairage électrique des théâtres et des grands magasins se recommande au point de vue de la sécurité et de l'hygiène ; aussi ce genre d'applications a-t-il pris un grand développement. Comme ces installations comptent généralement un grand nombre de lampes, on trouve souvent avantage à les munir de machines et de dynamos spéciales, même dans les villes où il existe des distributions d'électricité. Ces dernières ont, en effet, des frais généraux considérables résultant des canalisations et des taxes municipales, ce qui élève le prix de revient de l'énergie électrique au delà du prix de revient obtenu dans une usine spéciale d'une certaine importance, dont toute la puissance est utilisée pendant la durée de l'éclairage, alors que dans les usines urbaines le débit moyen des machines est relativement faible.

Parfois, un groupe d'habitations voisines possède une installation commune pour la production de l'énergie électrique. Les machines motrices et les dynamos s'installent dans une cave ou dans un hangar et celles-ci se raccordent avec les immeubles desservis par une canalisation qui est généralement aérienne, eu égard à la faible section admissible avec des conducteurs de peu de développement. Les fils sont placés sur les toits ou sur des poteaux plantés dans les

arrière-cours des bâtiments. Ce genre d'installations est très développé dans certaines villes. Il permet de se soustraire aux taxes municipales qui frappent les canalisations posées dans les rues et évite l'emploi des conducteurs souterrains qui constituent une des charges les plus lourdes des distributions urbaines. Toutefois, ce système d'éclairage exige une entente entre les propriétaires voisins. Comme chacun de ceux-ci est maître d'empêcher le passage des fils au-dessus de sa propriété, il suffit du mauvais vouloir de quelques-uns d'entr'eux pour arrêter le succès de l'entreprise.

Les moteurs employés dans ces installations doivent être aussi peu bruyants que possible, particulièrement lorsqu'ils sont placés dans les sous-sols d'un théâtre. On peut, dans ce dernier cas, étouffer complètement le bruit en tendant les parois de la chambre des machines d'un matelas de coton ou de laine. La propagation des vibrations mécaniques est évitée en adoptant les précautions spécifiées au § 400.

754. — **Dispositions particulières prises dans les théâtres.** — L'éclairage d'un théâtre exige, au point de vue tant de la sécurité que des effets spéciaux à produire dans la salle et sur la scène, des dispositions particulières.

L'éclairage intérieur se fait généralement par des lampes à incandescence, dont la teinte chaude se prête mieux que celle des lampes à arc aux effets de décoration et de toilette auxquels nos yeux sont habitués.

L'arc trouve son application dans les péristyles, ainsi que pour la production de certains effets de scène, tels que l'éclairage des ballets. On utilise souvent pour l'éclairage de la salle les supports des lampes à gaz, lustres et girandoles, sur lesquels on dispose des lampes à incandescence qui produisent un effet d'illumination autant que d'éclairement. Dans plusieurs théâtres, on a distribué les petites lampes à incandescence suivant des cordons dessinant les galeries des étages successifs. Cette disposition n'empêche pas, comme un lustre, la vue de la scène pour les spectateurs des étages supérieurs. On s'est bien trouvé également de l'emploi de lustres à cristaux, au milieu desquels on dissimule des lampes qui peuvent alors avoir une grande intensité. Les facettes cristallines dispersent les faisceaux lumineux, en même temps qu'elles produisent des jeux de lumière d'un effet agréable.

L'effet d'éclairement proprement dit peut s'obtenir plus économiquement par quelques grosses lampes à incandescence ou par quelques arcs suspendus au plafond, mais ce système s'écarte de nos habitudes et prête, par conséquent, à certaines critiques. En outre, la lumière des lampes à arc ne peut être graduée comme celle des lampes à incandescence pour produire les effets de crépuscule. L'éclairage de la scène, des loges d'artistes et des couloirs se fait par des lampes à incandescence. Souvent on dispose des lampes de secours alimentées par des circuits spéciaux reliés à des accumulateurs.

L'éclairage de la scène est celui qui présente la plus grande complication. La fig. 514 montre la répartition des lampes au théâtre du Vaudeville, à Paris (1). A la *rampe* se trouve une série de lampes fixes *c*. Plusieurs lignes de lampes sont suspendues à des *herses f*, *g*, *h*, *i*, *m*, à la partie supérieure de la scène; on fait varier la hauteur de ces lampes suivant la nature des décors. Le courant est amené aux herses par des câbles doubles qu'on fixe à des prises de courant situées au niveau du premier étage de la scène. Ces câbles flexibles sont souvent enfermés dans une gaîne de cuir afin d'éviter que les frottements n'amènent l'usure des isolants et ne mettent les conducteurs à nu. Les côtés de la scène sont, en outre, éclairés par des faisceaux de lampes fixées sur des planches verticales qu'on accroche aux *portants*. Des conducteurs souples semblables aux précédents alimentent les lampes des portants. Ils sont reliés à des conducteurs fixes représentés en pointillé et posés sous le plancher de la scène. Toutes ces lampes sont naturellement dissimulées aux spectateurs placés dans la salle par les décors et par des réflecteurs blanchis qui projettent toute la lumière vers la scène.

Il est important de protéger les circuits, particulièrement ceux qui comportent des conducteurs flexibles, par des fils de sûreté, à cause de l'inflammabilité des décors.

Dans la salle des machines G se trouve un tableau de distribution d'où partent les conducteurs principaux. Les lampes de la scène et de la salle, soumises aux effets de lumière, sont raccordées

(1) DIEUDONNÉ, *L'éclairage des Théâtres de Paris. La Lumière Électrique*, t. 29.

à un commutateur spécial ou *jeu d'orgue*, situé contre le mur séparant la salle du bas de la scène, à proximité du trou du souffleur ou dans la coulisse. Ce commutateur doit permettre d'affaiblir progressivement ou brusquement l'éclat des lampes, depuis l'intensité

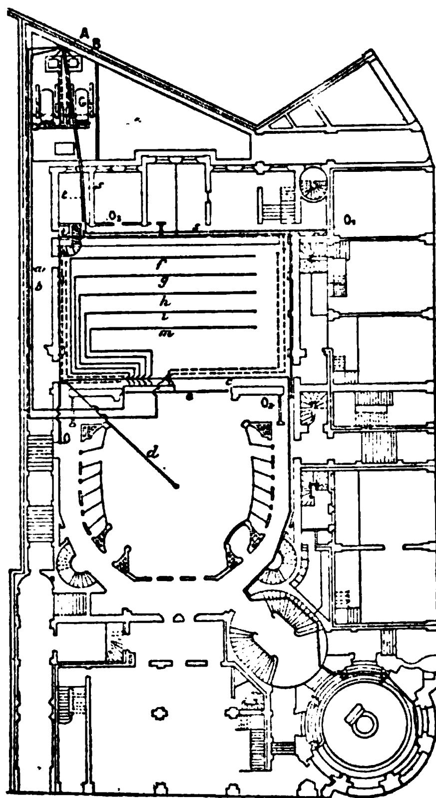



Fig. 514.

normale jusqu'à une intensité nulle.

Dans certaines installations très complètes, les herses et la rampe sont pourvues de trois séries de lampes qu'on peut substituer les unes aux autres. La première est formée de lampes ordinaires à ampoules incolores, la deuxième comporte des ampoules de verre rouge et la troisième des ampoules de verre bleu.

Ces deux dernières séries servent à produire des jeux de lumière spéciaux pour simuler les effets d'incendie, de jour baissant, etc.

Afin de graduer l'éclairement, les circuits spéciaux qui alimentent

les divers groupes de lampes de la salle et de la scène contiennent des résistances artificielles qu'on peut faire varier à l'aide de leviers placés dans le jeu d'orgue. Ces divers leviers se manœuvrent séparément ou simultanément. Dans ce dernier cas, on les embraie tous avec un arbre spécial commandé à l'aide d'une manivelle.

Les résistances artificielles nécessaires à ces jeux de lumière occupent un assez grand espace. Elles se composent de fils ou de toiles de maillechort ou de nickeline supportés par des isolateurs et tendus côte à côte sur un chassis en fer. On empêche les contacts entre les fils voisins à l'aide de séparations en carton d'amiante. Ces faisceaux de fils se placent sous le jeu d'orgue, dans le dessous de la scène. L'ensemble du commutateur et du rhéostat est protégé par une cage en tôle ou par des cloisons en briques destinées à éviter les dangers d'incendie. Les touches du commutateur doivent être assez nombreuses pour que la lumière varie par degrés insensibles pendant les manœuvres.

L'installation de trois séries de lampes de colorations différentes exige que tous les circuits et les commutateurs de la scène soient disposés en triple, ce qui entraîne des frais assez élevés. Dans certains cas, on évite ces frais en n'installant qu'une seule série de lampes à ampoules incolores aux herses et à la rampe, et en amenant devant ces lampes des écrans en gélatine rouges ou bleus, selon les effets à produire.

Parfois, les effets de théâtre exigent des foyers à arc mobiles, à l'aide desquels on projette des faisceaux de vive lumière sur certains points de la scène. Ces lampes, pourvues de réflecteurs paraboliques, sont maniées par des agents spéciaux. Elles sont placées sur un trépied à roulettes et pivotent sur un genou, afin que le faisceau lumineux puisse être dirigé aisément. Une lanterne munie d'une glace enferme complètement le foyer, pour éviter la chute de fragments de charbon incandescents.

Lorsque les théâtres contiennent leur installation motrice, on emploie deux moteurs et deux dynamos, un des groupes de machines pouvant alimenter les lampes strictement nécessaires, afin qu'en cas d'accident à l'une des machines, l'éclairage ne soit pas interrompu. L'emploi d'accumulateurs en quantité suffisante supplée à une machine de réserve.

755. — **Éclairage des trains.** — Depuis quelques années, de nom-

breux essais ont été effectués en vue d'éclairer les voitures des trains à l'aide de lampes à incandescence. Ces essais, limités d'abord aux wagons-salons, tendent à s'étendre à toutes les voitures des trains. Les lampes électriques peuvent se placer au-dessus du dossier des sièges, de manière à permettre aux voyageurs de lire avec commodité. Des abat-jour et des écrans mobiles servent à voiler la lumière pour les voyageurs placés en face des lampes. Partout où les essais ont eu lieu, le nouvel éclairage a été considéré comme un progrès considérable sur l'éclairage par les lampes à gaz ou à l'huile.

Les accumulateurs ont été reconnus indispensables dans cette application, afin de régulariser la tension des lampes et d'assurer la continuité de l'éclairage pendant la formation des trains et les arrêts.

Divers systèmes sont employés pour la production de l'énergie électrique et le chargement des accumulateurs.

1° Le système le plus généralement adopté consiste à placer sous chaque voiture, dans une ou plusieurs caisses en tôle, des boîtes renfermant les couples secondaires nécessaires à l'alimentation des lampes du wagon. Celles-ci ont une intensité lumineuse de 8 à 12 bougies décimales et sont soumises à une tension de 15 à 25 volts. Un commutateur ou un rhéostat permet de parer à la baisse de différence de potentiel occasionnée par la décharge des éléments, qui dure de 12 à 15 heures. Le poids d'accumulateurs pour une voiture varie de 120 à 600 kg, suivant le nombre de lampes, la longueur du wagon et le système de batterie employé.

Les accumulateurs se chargent à postes fixes, dans des dépôts où les voitures sont amenées et où les batteries sont mises en charge sans transbordement. On utilise, à ce service, le personnel des lampisteries.

2° Un second système consiste à charger les accumulateurs par une dynamo commandée par un moteur placé dans le fourgon de tête du train et recevant la vapeur de la chaudière de la locomotive. Cette disposition évite le retour des voitures au dépôt et permet un éclairage continu de longue durée, tel que celui exigé par les voitures effectuant des parcours étendus.

La vapeur d'échappement de la petite machine peut servir, pendant la mauvaise saison, au chauffage du train. Il faut remarquer, en effet, que si la vapeur est admise à 10 atmosphères

(179°96) et s'échappe à 1 atmosphère (100°), elle n'a perdu que 4 pour 100 de sa chaleur.

3° Un dernier système consiste à charger les accumulateurs en cours de route par une dynamo commandée par un essieu du fourgon. Cet essieu reçoit une poulie sur laquelle passe une courroie munie d'un tendeur et enroulée autour de la poulie de la machine électrique. Cette dernière ne peut évidemment charger les couples qu'à partir du moment où le train a acquis une vitesse déterminée. Il faut donc prévoir un commutateur automatique qui ferme le circuit de la dynamo lorsque cette vitesse est atteinte, et qui règle l'excitation lorsque l'allure du train devient trop rapide. Ce mécanisme est nécessairement assez délicat; aussi les essais de ce système n'ont-ils pas toujours réussi.

D'après le rapport présenté par MM. E. Sartiaux et Weissenbruch au Congrès des chemins de fer, en 1889, les essais effectués par le premier système, en Europe, ont donné un prix de revient de 1,9 à 3 centimes par lampe-heure, pour des lampes de 6 à 8 bougies. Le deuxième système, essayé aux États-Unis, coûte de 3,5 à 5 centimes par lampe-heure de 16 bougies. Enfin le troisième système est revenu, en Europe, à 4 ou 5 centimes par lampe-heure de 5 bougies.

En regard de ces prix, il est intéressant de placer le coût des autres systèmes d'éclairage. D'après le bureau impérial des chemins de fer allemands, le gaz coûte 3,764 centimes et l'huile de colza 5,636 centimes par lampe-heure de 5 à 6 bougies. La Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée paie 4,37 centimes pour le gaz, et celle du Gothard 5,37 centimes.

En présence de ces faits, la Commission technique de l'Union des chemins de fer suisses a, dans sa séance du 2 novembre 1889, formulé la conclusion suivante :

Eu égard à l'état actuel de l'éclairage électrique, on ne peut encourager le développement de l'éclairage au gaz des voitures de chemin de fer. Il est préférable d'étudier le système de l'éclairage des voitures à l'électricité et de chercher à le perfectionner par des essais pratiques.

**756. — Éclairage des mines.** — Lorsqu'une mine possède une distribution électrique servant à l'alimentation des moteurs, § 597, il est naturel d'employer le courant pour l'allumage des lampes

disposées à poste fixe. Dans les mines à grisou, ces lampes peuvent être rendues inoffensives, en cas de bris de l'ampoule, par une lanterne hermétiquement fermée et pourvue d'un globe en verre épais.

La propriété des lampes de mineur ordinaires de décéler la présence du grisou peut être suppléée par un avertisseur spécial basé sur la propriété que possède un filament conducteur traversé par un courant de s'échauffer davantage dans l'air que dans le grisou. Ainsi, un fil de platine porté au rouge par le courant noircit dans le grisou ou le gaz d'éclairage, par suite de la conductibilité calorifique plus grande de ces derniers qui refroidissent le filament. On peut mettre à profit la propriété de diffusion des gaz à travers des diaphragmes pour accumuler le grisou dans la cavité contenant le conducteur.

L'alimentation des lampes portatives, qui doivent contenir leur générateur électrique, présente plus de difficultés, à cause de la nécessité de donner un poids faible à l'appareil. Voici quelques renseignements extraits d'une communication de M. Watts.

La lampe Swan utilise quatre éléments secondaires groupés dans un bloc de gutta-percha renfermé dans une boîte en bois. Le poids de l'appareil est de 3,2 kg. La lampe d'une intensité lumineuse de 1 à 1,3 bougie peut brûler pendant 10 heures. Prix : 33,75 fr. Frais d'entretien journaliers : 5 centimes.

La lampe Schanschieff comprend une pile zinc-solution de sulfate mercureux-charbon. Le tout pèse 2,5 kg et est susceptible de produire une intensité de 2 à 3 bougies pendant 9 heures. Prix : 37,50 fr. Frais d'entretien journaliers : 6 centimes.

La lampe *Stella* à accumulateur pèse 1,4 kg et donne une lumière de 1 bougie. La pile secondaire est constituée de 2 éléments enfermés dans une caisse en tôle portant latéralement la petite lampe. Celle-ci est munie d'un réflecteur, de manière à projeter les rayons vers l'avant. Toute la lumière est ainsi utilisée, tandis que dans les lampes de mineur ordinaires, une faible partie seulement de la lumière de la flamme est utilisable. On estime la durée de la charge à 6,5 heures en moyenne et celle de la décharge à 12 heures, avec un courant de 1 ampère. L'amortissement de l'appareil coûtant 30 fr. s'évalue à 0,01 fr. l'heure; celui de la lampe proprement dite à 0,0026 fr. et les frais de chargement à 0,0074 fr., soit en tout 0,02 fr. par heure pour les frais d'entretien et d'amortissement.

## COÛT DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

757. — **Prix des appareils et des installations** [1]. — Afin de permettre de dresser approximativement les devis relatifs aux dépenses d'installation et d'exploitation de l'éclairage électrique, nous donnons ci après les prix des principaux appareils utilisés.

Ces chiffres se rapportent aux tarifs actuels des fabricants, mais il ne faut pas perdre de vue que l'extension de la concurrence et les progrès de la construction mécanique des appareils produisent d'année en année un abaissement des prix. On fera bien de vérifier soigneusement les détails de construction des appareils afin de voir si leur solidité est en rapport avec leur coût. Si l'on ne possède pas d'expérience spéciale, il est prudent de prendre l'avis de personnes expertes. En tous cas, il est bon de ne s'adresser qu'à des fabricants sérieux.

Le prix des dynamos varie avec le type et la grandeur de ces machines. Ainsi, les dynamos à grande vitesse angulaire sont plus économiques que les dynamos à allure plus lente, car, à vitesse périphérique égale, les premières sont plus légères et plus faciles à construire.

Les prix établis par les différents constructeurs tendent à se niveler aux taux uniforme de 2 francs par kilogramme de matière totale. Il s'opérera naturellement des réductions avec les progrès effectués dans la construction mécanique des machines, mais ces réductions ne seront pas très importantes étant donné le prix du cuivre qui constitue un des éléments principaux de la construction [2]. A cet égard, les machines à grand rendement, qui absorbent plus de cuivre dans leur construction, sont les plus coûteuses.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Les dynamos de | 8 kilowatts | coûtent de | 200 à 300 | fr. par | kilowatt. |
| » | 20 | » | 150 à 250 | » | » |
| » | 60 et au delà | » | 100 à 200 | » | » |

Le prix d'une installation à vapeur complète, machine, chau-

---

(1) H. Fontaine, *Traité d'éclairage électrique*. Paris, Baudry.

(2) Hospitalier, *Formulaire pratique de l'Électricien*. Paris, Masson.

dière et accessoires, s'élève de 225 à 275 fr. par cheval avec les moteurs à grande vitesse, et de 325 à 375 fr. avec les machines à faible vitesse. Il faut ajouter à ces prix ceux des fondations qui sont beaucoup plus importantes dans le second cas.

Les prix des régulateurs à arc voltaïque varient de 80 à 200 fr. suivant les types et les garnitures. Ceux des lampes à incandescence sont voisins de 1 fr. par unité, avec des réductions proportionnelles à la quantité acquise. Les charbons à lumière, de 6 à 14 mm de diamètre, coûtent de 0,30 fr. à 0,60 fr. le mètre courant. Les charbons à mèche se paient 0,10 fr. de plus au mètre.

Le coût des accumulateurs est de 0,50 fr. à 1,20 fr. par watt de puissance spécifique.

Les conducteurs sont cotés à des prix variables avec leurs diamètres et la nature des isolants. Voici un tableau extrait du prix-courant d'un des principaux fabricants belges.

| *Nombre de brins.* | *Section totale en mm².* | *Fils nus.* | *Fils à isolement ordinaire.* | *Fils à isolement fort.* |
|---|---|---|---|---|
| | | *Prix, par hectomètre de fil, en francs.* | | |
| 1 | 0,5 | 1,35 | 6,10 | 12,50 |
| 1 | 1,0 | 2,75 | 8,40 | 16,50 |
| 1 | 1,5 | 4,10 | 10,75 | 19,00 |
| 1 | 2,5 | 6,50 | 15,00 | 26,00 |
| 1 | 6,0 | 15,60 | 27,50 | 43,00 |
| 1 | 10,0 | 27,25 | 41,50 | 62,50 |
| 1 | 25,0 | 65,00 | 92,50 | 133,00 |
| 7 | 35,0 | 93,75 | 142,00 | 200,00 |
| 19 | 50,0 | 135,00 | 203,00 | 280,00 |
| 19 | 95,0 | 255,00 | 365,00 | 475,00 |

Nous donnons dans le tableau de la page 508, d'après M. Crompton, le prix de canalisations souterraines comprenant des câbles isolés et des conducteurs nus.

L'installation complète du matériel électrique nécessaire à un foyer à arc de 1 500 bougies décimales est estimée à 800 fr.; pour 30 foyers de 1 500 bougies le prix est de 500 fr. par foyer.

Le matériel électrique complet pour 60 lampes à incandescence de 16 bougies coûte de 50 à 60 fr. par lampe dans une installation

*Dépenses d'établissement d'un décamètre de conducteurs doubles, pour circuits à haute tension, sous les trottoirs de Londres.*

| | 7 FILS CORDÉS. | 19 FILS CORDÉS. | 19 FILS CORDÉS. | 19 FILS CORDÉS. | 37 FILS CORDÉS. | 2 CORDES DE 37 FILS. | 4 CORDES DE 37 FILS. | 6 CORDES DE 37 FILS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Section en millimètres carrés . . | 14,6 | 50 | 104 | 161,25 | 322 | 645 | 1290 | 1935 |
| Prix du cuivre, à fr. 1,80 le kg, en fr. | 4,73 | 16,20 | 34,60 | 51,40 | 118,00 | 216 | 408 | 614 |
| Prix de l'isolement . . . . . . | 12,30 | 27,80 | 68,00 | 98,20 | 194,00 | 388 | 775 | 1135 |
| Enveloppe de bitume et ciment, main-d'œuvre de pose, tranchée et réfection du trottoir, regards et boites de distribution, ingénieur et surveillants . | 130,00 | 145,00 | 170,00 | 170,00 | 194,50 | 233 | 370 | 480 |
| Dépense totale par décamètre, fr. | 147,03 | 189,00 | 272,60 | 319,60 | 506,50 | 837 | 1553 | 2229 |

*Dépenses d'établissement d'un décamètre de conducteurs doubles en cuivre nu portés sur des isolateurs dans un caniveau sous les trottoirs.*

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Section en millimètres carrés . . . . . . . . . . . . | 161,25 | 322 | 645 | 1290 | 1645 | 1935 |
| Prix du cuivre, à fr. 1,80 le kg, en fr. . . . . . . . . | 51,40 | 118 | 216 | 408 | 520 | 645 |
| Pose, isolateurs, regards et boites de raccordement, caniveau de 48 cm sur 30 cm en briques et ciment, réfection du trottoir, ingénieur et surveillants . . . . . . . . | 204,00 | 240 | 240 | 240 | 240 | 250 |
| Dépense totale par décamètre . . . . . . . . . . fr. | 255,40 | 358 | 456 | 648 | 760 | 895 |

domestique. Le prix est un peu inférieur dans une installation industrielle, où l'on peut faire certaines économies dans l'appareillage. Sans les dynamos et leurs accessoires, le prix est de 20 à 25 fr. par lampe.

758. — **Données relatives aux distributions d'électricité urbaines.** — Depuis quelques années, les compagnies concessionnaires de l'éclairage électrique des villes anglaises ont commencé à publier des résultats d'exploitation qui renferment des enseignements précieux pour les ingénieurs appelés à étudier des stations centrales.

Parmi les distributions à courants alternatifs de haute tension (1 000 à 2 000 volts) qui sont entrées dans la période de rapport, nous mentionnerons celles des compagnies suivantes : *Newcastle on Tyne*, *Newcastle and District, Metropolitan* (Londres), *House to House* (Londres) et *Eastbourne*.

Les distributions à courant continu de basse tension s'effectuent suivant des systèmes divers. La Compagnie *St James*, de Londres, utilise le système à 3 conducteurs, sans accumulateurs. Elle exploite un périmètre restreint englobant le quartier le plus favorable de la ville au point de vue de la durée de l'éclairage. Les Compagnies de *Kensington* et de *Westminster* ont, au contraire, surtout la première, une clientèle clairsemée d'abonnés utilisant leurs lampes pendant peu de temps. Elles ont choisi le système à trois fils avec réserve d'accumulateurs, pour éviter de faire fonctionner les machines d'une manière continue et pour venir en aide à celles-ci aux heures de grand débit. L'éclairage de *Bradford* est réalisé par un système analogue. Enfin, la Compagnie de *Chelsea* (Londres) utilise des sous-stations d'accumulateurs du système King, § 509, lesquelles entraînent une immobilisation considérable de batteries secondaires.

Les tableaux suivants indiquent les frais de premier établissement et les frais de génération de l'énergie électrique dans les usines de ces compagnies.

*Frais de premier établissement.*

| | CAPITAL ENGAGÉ. | | TERRAINS. | CONSTRUCTIONS. | MATÉRIEL. | CONDUCTEURS. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | TOTAL EN MILLIERS DE FRANCS. | PAR LAMPE DE 8 BOUGIES INSTALLÉE. | POUR CENT DU CAPITAL TOTAL. | | | |
| Chelsea . . . | 1 868 | fr. 68 | 0,7 | 13,7 | 45,9 | 24,0 |
| House to House | 1 459 | 75 | 0,1 | 13,4 | 38,1 | 27,6 |
| Kensington . . | 3 515 | 91 | 4,0 | 11,3 | 32,6 | 36,3 |
| Metropolitan . | 12 173 | 148 | 2,5 | 25,6 | 39,4 | 21,8 |
| St James . . . | 3 486 | 90 | 21 4 | 9,4 | 29,8 | 31,5 |
| Westminster . | 7 441 | 119 | 5,7 | 18,1 | 23,7 | 44,9 |

Voici le détail des dépenses d'installation par lampe de 35 watts (8 bougies) à Newcastle. Le total est exceptionnellement bas.

| | | |
|---|---|---|
| Constructions . . . . . . . . . . . . . . . | fr. | 3,35 |
| Matériel . . . . . . . . . . . . . . . | » | 16,50 |
| Commutateurs . . . . . . . . . . . . . | » | 0,75 |
| Tuyaux, boîtes de jonction . . . . . . . . | » | 5,75 |
| Conducteurs de canalisation . . . . . . . . | » | 5,75 |
| Divers . . . . . . . . . . . . . . . | » | 0,40 |
| Transformateurs . . . . . . . . . . . . | » | 5,25 |
| | Fr. | 37,75 |

Si l'on ne tient compte ni de l'amortissement, ni de la dépréciation, voici l'ordre des frais par kilowatt-heure des usines anglaises :

| | | |
|---|---|---|
| Bradford . . . . . . . . . . . . . . . | fr. | 20,72 |
| Newcastle . . . . . . . . . . . . . . | » | 30,54 |
| St James . . . . . . . . . . . . . . | » | 38,32 |
| Kensington . . . . . . . . . . . . . | » | 31,10 |
| Metropolitan . . . . . . . . . . . . . | » | 55,87 |
| House to House . . . . . . . . . . . . | » | 58,12 |
| Westminster . . . . . . . . . . . . . | » | 61,10 |
| Eastbourne . . . . . . . . . . . . . | » | 67,95 |
| Chelsea . . . . . . . . . . . . . . | » | 72,70 |

*Tableau des frais proportionnels de génération de l'énergie électrique.*

| *Nom des compagnies.* | *Charbon.* | *Huile, eau, divers.* | *Traitement des ingénieurs et agents des usines.* | *Réparation et entretien des constructions, dynamos, moteurs, chaudières, accumulateurs, canalisations, etc.* | *Loyers, impôts, taxes.* | *Traitement de l'Administration centrale, frais de bureau, assurances et frais généraux divers.* | *Dépréciation des constructions et du matériel.* | *Amortissement.* | *Total.* | *Prix de vente du kilowatt-heure.* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prix de revient, en centimes, par kilowatt-heure. | | | | | | | | | | |
| **BASSE TENSION.** | | | | | | | | | | |
| St James | 11,02 | 1,78 | 7,98 | 5,25 | 2,00 | 10,29 | 9,45 | 2,31 | 50,08 | 73,5 |
| Westminster | 15,75 | 4,41 | 16,69 | 1,47 | 6,82 | 15,96 | 4,30 | 1,89 | 67,29 | 81 |
| Kensington | 13,23 | 1,78 | 11,55 | 10,05 | 3,78 | 10,71 | 2,10 | 0,63 | 53,83 | 84 |
| Bradford | 5,58 | 1,05 | 5,67 | 2,52 | 2,73 | 2,94 | 11,55 | 10,40 | 42,44 | 63 |
| Liverpool | 10 | 2,2 | 5 | 6,3 | 2,4 | 7,1 | 1,2 | 6,5 | 40,7 | 84 |
| Chelsea | 23,31 | 7,45 | 11,66 | 10,01 | 3,88 | 16,38 | 0 | 0 | 72,66 | 84 |
| **HAUTE TENSION.** | | | | | | | | | | |
| Newcastle on Tyne | 6,96 | 2,31 | 8,57 | 2,60 | 3,15 | 6,95 | 0 | 0 | 30,54 | 44,5 |
| — and district. | 14,91 | 2,31 | 8,03 | 1,05 | 3,57 | 5,67 | 4,83 | 2,41 | 42,83 | 63 |
| House to House | 23,41 | 2,31 | 16,38 | 5,30 | 3,78 | 7,04 | 0 | 0 | 58,22 | 84 |
| Eastbourne | 22,89 | 2,31 | 12,49 | 7,35 | 10,19 | 12,70 | 12,50 | 0 | 80,43 | 105 |

Recette moyenne par lampe de 35 watts (8 bougies) installée :

| | | |
|---|---|---|
| Kensington . . . . . . . . . . . . . . . . | fr. | 9,65 |
| Chelsea . . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 10,30 |
| Newcastle. . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 11,15 |
| House to House . . . . . . . . . . . . . | » | 11,65 |
| Metropolitan. . . . . . . . . . . . . . . | » | 14,60 |
| Eastbourne . . . . . . . . . . . . . . . | » | 14,70 |
| Westminster. . . . . . . . . . . . . . . | » | 18,90 |
| St James . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 24,05 |
| Bradford . . . . . . . . . . . . . . . . | » | 24,15 |

Cette dernière usine alimente beaucoup de moteurs électriques, dont la puissance a été réduite en lampes pour la comparaison.

Les résultats précédents conduisent à quelques conclusions intéressantes.

Les systèmes à courants alternatifs de haute tension paraissent réussir particulièrement là où la clientèle est clairsemée et la force motrice à bas prix. On remarquera, en effet, que, par suite de l'excitation continue des transformateurs placés chez les abonnés, la dépense d'énergie mécanique est notablement plus grande avec les courants alternatifs. A Newcastle, où le charbon ne coûte que 7,25 fr. la tonne, les 9,54 kg de charbon dépensés par kilowatt-heure ne représentent que 15 pour 100 du prix de vente, tandis qu'à Londres, la *Metropolitan Co*, avec 9,1 kg de charbon dépensés, grève de 36,37 pour 100 son prix de revient, ce qui la conduit à ne réaliser aucun bénéfice, même en supprimant tout amortissement. Ce fait tient à ce que le charbon sec coûte 27 fr. la tonne à Londres.

Les systèmes à courant continu de basse tension, avec petite réserve d'accumulateurs, donnent en Angleterre des résultats avantageux lorsque le combustible est cher, même quand la clientèle n'est pas très compacte. Les systèmes utilisant une grande quantité d'éléments secondaires (Chelsea) conduisent à des résultats moins favorables.

**759. — Prix de revient de l'éclairage électrique industriel.** — Le prix de l'éclairage électrique varie avec la nature du moteur employé, le nombre total de lampes placées et la durée moyenne d'allumage des foyers.

Dans les usines où l'on dispose souvent d'un surcroît de force motrice, le prix de l'énergie mécanique ne monte guère qu'à 5 centimes le cheval-heure. Mais lorsqu'un moteur spécial doit être installé dans une habitation privée, le prix du cheval peut atteindre 10 à 30 centimes par heure, selon l'importance du moteur et la durée du fonctionnement. Les moteurs à gaz livrent le cheval-heure à fr. 0,25, si le gaz coûte fr. 0,10 le mètre cube.

Les renseignements publiés par les compagnies de chemins de fer peuvent servir de base pour l'établissement du coût de l'éclairage industriel. Suivant les données statistiques contenues dans le rapport dressé par MM. E. Sartiaux et Weissenbruch pour le Congrès des chemins de fer de 1889, le prix de l'éclairage, rapporté au *kilowatt-heure*, revient, tous frais généraux et d'entretien des installations et des lampes compris, dans les installations de gare les plus récentes,

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| à 1,20 fr. | pour | 500 | heures | d'éclairage | par an |
| 0,95 | » | 1 000 | » | » | » |
| 0,75 | » | 1 500 | » | » | » |
| 0,58 | » | 2 000 | » | » | » |
| 0,42 | » | 3 000 | » | » | » |
| 0,34 | » | 4 000 | » | » | » |

Ces prix sont basés sur les résultats obtenus dans des installations comprenant de 34 à 70 lampes à arc et de 30 à 940 lampes à incandescence. Fait curieux, le prix de 0,34 fr. pour 4 000 heures d'éclairage concorde à peu près exactement avec les données moyennes déduites par M. Raymond des résultats de l'éclairage public de 336 localités des États-Unis.

Les rapporteurs ont trouvé que le prix de revient de l'éclairage par incandescence est inférieur à celui de l'éclairage au gaz, ce dernier étant compté à 18 centimes le m$^3$, lorsque la durée de l'allumage dépasse 3 250 heures par an. Quant à l'éclairage par arcs, il faudrait, à partir de 2 000 heures d'éclairage par an, que le gaz fut à 7 centimes le m$^3$ pour entrer en lutte avec l'électricité, même en employant les becs intensifs les plus perfectionnés. Pour 3 000 heures, le prix du m$^3$ devrait être inférieur à 5 centimes.

Ces résultats économiques, joints aux grands avantages que procure l'éclairage par les foyers puissants dans les gares, § 752, ont engagé la plupart des compagnies de chemins de fer à généraliser l'emploi de la lumière électrique.

On a admis, dans les conclusions précédentes, que le bec de gaz dont l'intensité est comparable à celle d'une lampe à incandescence de 16 bougies ne dépense que 150 litres par heure, ce qui est une hypothèse très favorable au gaz, au dire des rapporteurs. Les lampes Wenham donnant 170 bougies décimales dépensent 720 litres, celles de 1 450 bougies, 4 500 litres. Les foyers à arc d'intensités correspondantes absorbent respectivement 157 et 750 watts.

Dans les trois hypothèses, un mètre cube de gaz équivaut, au point de vue de la production de la lumière, respectivement à 300, à 218 et à 166 watts.

D'après M. Wybauw, ingénieur de la ville de Bruxelles, qui possède une grande expérience dans les questions d'éclairage, les lampes à gaz à bec circulaire consomment pratiquement 190 litres de gaz pour un bec de 16 bougies. On obtient dans les laboratoires des rendements plus avantageux en réglant soigneusement la pression au bec, mais, dans la pratique journalière, il est impossible d'obtenir ces soins. Les lampes perfectionnées, telles que le système à double couronne, ne se répandent pas par suite de leur prix et de l'entretien plus soigné qu'elles exigent. Au contraire, dans beaucoup de cas, on recourt aux becs fendus sans cheminée dont la consommation horaire atteint 20 litres par bougie.

M. Fontaine, également très expert en matière d'éclairage, estime à 200 litres la dépense moyenne de gaz pour la production d'une flamme de 16 bougies décimales au moyen des becs usuels.

D'après des expériences effectuées par MM. Rousseau et Van Vloten sur les becs de gaz employés au Théâtre de la Monnaie, à Bruxelles, voici les consommations moyennes de gaz des différents brûleurs, pour une lumière équivalente à 16 bougies décimales :

| | | |
|---|---|---|
| bec papillon en fer. . . . . . . . . . . . . | 368 | litres |
| bec papillon en stéatite . . . . . . . . . . . | 325 | — |
| bec rond en stéatite à 12 trous . . . . . . . . . | 252 | — |
| bec rond en stéatite à 42 trous. . . . . . . . . | 188 | — |

**760. — Tarifs de l'énergie électrique fournie par les usines urbaines. Comparaison avec les autres illuminants.** — Les systèmes de tarification adoptés par les stations centrales sont variables ; ils peuvent se diviser en deux principaux : abonnement à forfait et abonnement au compteur.

Dans certaines villes, les usines centrales ne fonctionnent pas d'une manière continue; les machines ne tournent que de la tombée de la nuit à minuit, par exemple. Dans ce cas, les contrats entre la société de distribution et les abonnés portent souvent une redevance fixe par lampe et par an.

Ce système à forfait est tout indiqué lorsque les sociétés électriques entreprennent l'éclairage des rues, car alors la durée d'allumage des lampes est invariable.

Dans les villes où l'on exige que les distributions fonctionnent nuit et jour, on règle presque partout les taxes des abonnés suivant les indications de compteurs donnés en location comme les compteurs à gaz ou à eau.

Le prix de l'énergie électrique fournie varie avec celui du combustible, à moins qu'on n'utilise une chute d'eau. A Londres, le prix de vente du kilowatt-heure est, en moyenne, de 0,80 fr. A Newcastle, en plein bassin houiller, le prix descend jusque 0,46 fr. Sur le continent, le prix moyen paraît voisin de 1 fr., par suite du coût plus élevé du combustible et des redevances payées aux municipalités par les compagnies d'éclairage. Partout on prévoit des réductions de tarif allant jusque 50 pour cent, lorsque la durée d'allumage des lampes suit une progression croissante. Par contre, lorsqu'un abonné possède des lampes qu'il allume rarement et qui peuvent, à un moment donné, provoquer un accroissement de demande d'énergie auquel l'usine doit faire face par des machines de réserve, il est juste d'exiger une majoration de tarif. On peut, par exemple, frapper chaque lampe d'un droit fixe annuel ou imposer un minimum de consommation par foyer.

L'énergie électrique utilisée dans les moteurs est dégrevée en vue de favoriser la production des usines pendant le jour.

Étant donné le prix de l'énergie électrique, il est facile d'évaluer le coût de l'éclairage par heure.

*Cas d'une lampe à incandescence de 16 bougies, consommant 50 watts, le tarif étant de 0,80 fr. le kilowatt-heure et la durée de la lampe de 1 000 heures.*

1. Prix de l'énergie . . . . . . . . . . . . . fr. 0,0400

2. Intérêt et amortissement à 10 pour 100 sur 25 fr. représentant le prix de l'installation intérieure par lampe, pour

700 heures d'allumage, soit par heure . . . . . . . . . fr. 0,0036

3. Renouvellement de la lampe coûtant 3 fr. et fonctionnant 1 000 heures . . . . . . . . . . . . . . . . » 0,0030

Par lampe et par heure : fr. 0,0466

*Cas d'une lampe à arc de 8 ampères.*

1. Prix de l'énergie, 440 watts, . . . . . . . . . . fr. 0,352

2. Intérêt et amortissement à 10 pour 100 sur 200 francs représentant le prix de la lampe et sa quote-part d'installation, pour 700 heures d'allumage . . . . . . . . » 0,029

3. Consommation de charbons et placement de ceux-ci. » 0.050

Par lampe et par heure : fr. 0,431

Nous avons cité, au § 737, la valeur des rendements des diverses sources lumineuses usuelles, et nous avons reconnu que les foyers électriques ont un effet utile très supérieur à celui des lampes à flamme. Il est intéressant de rapprocher de ces chiffres les consommations horaires des divers foyers par bougie décimale.

| NATURE DES FOYERS. | ÉLÉMENTS CONSOMMÉS. | PRIX DE L'UNITÉ. | QUANTITÉS CONSOMMÉES PAR BOUGIE DÉCIMALE. | PRIX DE LA CONSOMMATION PAR BOUGIE DÉCIMALE. |
|---|---|---|---|---|
| | | Francs. | | Centimes |
| Bougie . . | Paraffine<br>Spermaceti | 1,50 le kg | 9 gr | 1,350 |
| Lampe modérateur . | Huile de colza | 1,00 le kg | 4,2 gr | 0,420 |
| Lampe à pétrole . . | Pétrole | 0,20 le kg | 2,5 gr | 0,050 |
| Bec papillon | Gaz | 0,20 le m³ | 20 litres | 0,400 |
| Bec Bengel. | Id. | Id | 12 litres | 0,240 |
| Lampes à incandescence | Électricité | 0,80 le kilowatt-heure | 3,5 watts | 0,280 |
| Lampes à arc voltaïque . | Id. | 0,80 id. | 0,6 watt | 0,048 |

Ces chiffres montrent que l'éclairage domestique fourni par le pétrole est de beaucoup le plus économique dans les pays où cette

substance n'est pas frappée de droits élevés. Cependant l'incommodité et les dangers de ce mode d'éclairage lui ont fait préférer le gaz dans un grand nombre d'installations, malgré la dépense considérablement plus élevée qui en résulte.

A son tour, l'éclairage par incandescence tend à se substituer au gaz dans les villes où existent des distributions d'électricité bien établies, par suite de ce que l'éclairage électrique est plus hygiénique, plus propre et plus commode que l'éclairage au gaz et qu'il réalise le plus parfait des modes d'éclairement artificiels. Cependant, au prix actuel de l'énergie fournie par les usines électriques européennes, les lampes à incandescence donnent une lumière sensiblement plus chère que les becs à gaz Bengel qui, bien qu'anti-hygiéniques, contribuent l'hiver au chauffage des locaux. La différence de prix ira toutefois en s'atténuant ; pour s'en convaincre, il suffit de considérer qu'un kilogramme de charbon produit une énergie égale à un cheval-heure, laquelle entretient 10 lampes à incandescence de 16 bougies, soit 160 bougies ; la même quantité de combustible fournit 280 litres de gaz développant dans les becs Bengel 24 bougies seulement. Aux États-Unis, où le charbon à gaz est cher, l'électricité est, dès à présent, plus avantageuse que le gaz dans plusieurs villes.

Lorsque la grandeur des locaux se prête à l'emploi de l'arc voltaïque, l'électricité apporte partout une sérieuse économie, même relativement aux becs à gaz intensifs les plus perfectionnés, § 759.

Si, en Europe, l'éclairage électrique par incandescence revient actuellement plus cher que le gaz, on peut dire que les avantages qu'il procure compensent dans bien des cas la différence de prix.

La détérioration par le gaz des tentures et des décorations intérieures oblige à des frais d'entretien qu'on peut supprimer en recourant à l'éclairage électrique. Il est juste de tenir compte de l'amélioration apportée dans les conditions de travail soit des gens d'étude, soit des ouvriers, par un mode d'éclairage qui ne produit ni chaleur ni gaz délétère. La diminution des dangers d'incendie et la suppression complète des risques d'explosion et d'asphyxie sont également des éléments à considérer ; elles ont conduit diverses compagnies d'assurances à dégrever les bâtiments éclairés à l'électricité. Un point d'une importance réelle est la commodité d'extinction des lampes électriques. Les lampes à gaz éclairant les

couloirs, les dégagements et même les pièces principales des appartements brûlent souvent sans nécessité, parce qu'on cherche à s'éviter l'ennui des rallumages. Rien de semblable avec l'électricité. En pénétrant dans une pièce, on tourne un bouton qu'on peut rendre lumineux par un enduit phosphorescent ; en sortant, on coupe le circuit, et la dépense d'éclairage est réduite au strict nécessaire. Enfin, il ne faut pas oublier que les lampes à gaz nécessitent un certain entretien ; les verres doivent être frottés journellement ; les trous des becs nettoyés de temps à autre ; chaque fois que la pression varie par suite de l'allumage de becs voisins, il faut toucher au robinet de réglage pour que la flamme du gaz ne brûle pas dans de mauvaises conditions, à moins qu'on n'emploie des régulateurs qui exigent eux-mêmes de l'entretien. Tous ces petits soins sont complètement évités avec les lampes à incandescence.

La propriété des lampes à incandescence de ne développer que peu de chaleur est mise à profit pour rapprocher considérablement les foyers des points à éclairer. Ainsi l'éclairage d'un pupitre de bureau peut se faire par une seule lampe de 8 bougies, placée à une trentaine de centimètres de la tête du buraliste sans incommoder celui-ci. Un bec de gaz doit, au contraire, être éloigné à près d'un mètre et exige par suite une intensité lumineuse beaucoup plus forte pour produire un même éclairement utile. De là résulte une économie indirecte notable dans l'éclairage des bureaux et des ateliers par l'électricité.

L'ensemble de ces considérations fait que, partout où les stations centrales sont bien établies, elles trouvent immédiatement une clientèle nombreuse et prennent une extension rapide.

Aussi les gaziers, qui traitent volontiers la lumière électrique d'éclairage de luxe, comme si le gaz n'était pas lui-même luxueux par rapport au pétrole, commencent-ils à comprendre que leur véritable intérêt est de prendre en mains l'exploitation de l'électricité, afin de ne pas se voir enlever leur meilleure clientèle. Dans nombre de villes, les sociétés de gaz ont installé des usines électriques.

Comme les villes tirent, en général, un revenu important de l'éclairage effectué en régie ou par des sociétés concessionnaires, elles ont intérêt au développement des exploitations électriques,

en vue de restreindre la multiplication des distributions limitées à des blocs de maisons, qui n'empruntent pas la voirie pour les canalisations et partant ne paient aucune redevance.

En fait, la lutte entre les divers illuminants profite à chacun d'eux. Nos yeux demandent de plus en plus de lumière. Lorsque, dans une ancienne salle de fêtes, nous allumons les bougies des lustres, nous trouvons mesquin un éclairage considéré autrefois comme très brillant. En 1745, la Galerie des Glaces du Palais de Versailles était illuminée, à l'occasion du mariage du Dauphin, à raison de 2,5 bougies par $m^2$, tandis que, sous la troisième République, les salons de l'Hôtel-de-Ville de Paris reçoivent, les jours de réception, un nombre de lampes correspondant à 16 bougies par $m^2$. On est encore loin, toutefois, de la lumière diffuse du jour, qui constitue l'éclairage idéal et qui fournit environ 50 bougies à 1 m. Aussi, la concurrence de l'électricité, du gaz et du pétrole, loin de tuer l'un des rivaux, n'a fait que les développer tous les trois.

Le tableau suivant, soigneusement compilé par M. Fontaine, montre les progrès rapides de l'éclairage électrique à Paris. Le pétrole n'a pas atteint, dans cette ville, le même développement que dans d'autres pays, par suite du droit d'entrée, qui représente le triple de sa valeur.

*Quantités de lumière consommées à Paris par an et par habitant, évaluées en bougies décimales-heure.*

| ANNÉES. | BOUGIES et CHANDELLES. | HUILES | | GAZ. | ÉLECTRICITÉ. | QUANTITÉS TOTALES. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | VÉGÉTALES. | MINÉRALES. | | | |
| 1855 | 220 | 1174 | » | 2376 | » | 3770 |
| 1872 | 250 | 967 | 503 | 4272 | » | 5992 |
| 1877 | 210 | 770 | 722 | 4776 | 65 | 6543 |
| 1883 | 217 | 649 | 1244 | 6086 | 230 | 8426 |
| 1889 | 190 | 517 | 1995 | 6470 | 2130 | 11302 |

## PROJETS D'ÉCLAIRAGE.

**761. — Règles à suivre dans les installations d'éclairage électrique.** — L'électricité ne présente pas, comme le gaz, des dan-

gers d'explosion et d'asphyxie, et, dans une installation faite avec soin, les dangers d'incendie sont très restreints ; aussi, un grand nombre de municipalités ont-elles prescrit l'emploi de l'éclairage électrique dans les théâtres. Toutefois une installation électrique mal faite peut donner lieu à l'inflammation des matières combustibles voisines des conducteurs et il convient de ne s'adresser pour l'exécution des entreprises d'éclairage qu'à des firmes sérieuses, possédant un personnel technique capable et exercé, et non à des constructeurs qui tirent leur principal profit de la vente d'un matériel défectueux et font ainsi le plus grand tort à l'industrie naissante de l'éclairage électrique.

Il convient de ne pas adopter une tension trop élevée dans les circuits à portée du public. On est généralement d'accord pour fixer entre 200 et 250 volts la différence de potentiel limite à laquelle une personne peut être soumise ; on ne cite pas d'ailleurs d'accidents sérieux occasionnés par des courants continus dont la tension est inférieure à 500 volts.

Si l'on touche un point d'un circuit mal isolé, on produit une dérivation à travers le corps à moins qu'on ne repose sur un diélectrique. L'établissement du courant dérivé détermine une commotion nerveuse, mais il n'y a réellement de danger que lorsque la tension est très élevée ; il se produit alors des effets électrolytiques et calorifiques qui amènent des modifications plus ou moins profondes dans l'organisme. Si l'on touche à la fois des conducteurs en relation avec les deux pôles d'un générateur, les effets sont plus marqués par suite de l'accroissement de la différence de potentiel à laquelle le corps est soumis.

Pour éviter pareils accidents avec les générateurs à haute tension, on fera bien de munir les ouvriers d'un gant et de galoches en caoutchouc et de leur recommander de ne toucher que d'une main les appareils intercalés dans les circuits. Dans les cas semblables, quelques industriels habituent leurs ouvriers à mettre une main en poche ou derrière le dos.

Les courants alternatifs déterminent des effets différents : les changements de potentiel produisent dans le corps des courants variables qui affectent surtout le système nerveux. On a reconnu que le corps est capable de supporter une tension continue double de la tension alternative limite.

Voici quelques dispositions recommandées pour assurer la sécurité des installations électriques. Plusieurs d'entr'elles sont prescrites par les compagnies d'assurances, en vue de permettre une réduction de prime par rapport aux installations éclairées au gaz ou au pétrole.

Les conducteurs doivent avoir une section et une conductibilité suffisantes pour que le courant qui les traverse puisse prendre une intensité double de l'intensité normale sans compromettre les isolants qui les entourent. Il convient que ces isolants ne se ramollissent pas à une température inférieure à 90° C et qu'ils empêchent le conducteur de se décentrer sous son propre poids.

Les sections à donner aux conducteurs peuvent être déduites des tableaux et formules résultant des expériences de M. Kennely, § 474. Plusieurs compagnies admettent les densités de courant suivantes par $mm^2$ :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 4 | ampères | jusque | 5 | $mm^2$ | de section |
| 3 | » | » | 15 | » | » |
| 2,5 | » | » | 100 | » | » |
| 2 | » | au delà de | 100 | » | » |

Pour les circuits des moteurs on réduit la densité de courant de moitié.

Il convient de ne pas tolérer de fils uniques ayant moins de 1 mm de diamètre.

Dans les installations intérieures, on exige généralement que les conducteurs aient une gaine isolante continue et, lorsqu'ils sont posés dans des lieux humides ou accessibles à l'humidité, que l'enveloppe soit imperméable. L'imperméabilité peut être assurée par une gaine de plomb au-dessus de la couverture diélectrique. Le plomb a toutefois l'inconvénient de favoriser les contacts avec la terre, particulièrement aux plis des conducteurs ; de plus, il est attaqué par les rats. Il faut le protéger par une enveloppe goudronnée lorsqu'il est accessible aux rongeurs.

Il convient de disposer autant que possible les conducteurs de manière qu'on puisse les retirer aisément pour les visiter. Dans ce but, au lieu de les enfouir sous les plâtras des murs, on les enferme dans des moulures en bois en deux parties qui se fixent l'une à l'autre par des vis. Les fils sont logés dans des rainures creusées dans le bois des moulures et distantes d'un cm au moins.

Depuis quelques années, on protège souvent les conducteurs par des tubes en papier comprimé et imprégné de bitume (systèmes Bergmann, etc ). Les tubes sont soutenus par des cavaliers en tôle de laiton et raccordés par des manchons de même métal, le joint étant rendu étanche par le chauffage du bitume. Aux coudes, on a soin de ménager des courbes adoucies. Les conducteurs, concentriques pour les petits diamètres, sont tirés dans la conduite et raccordés entr'eux dans des boîtes de jonction disposées aux branchements. Ce système permet une pose rapide. De plus, il se prête au retrait des conducteurs et à leur remplacement sans dégradations. Afin d'éviter les courts-circuits auxquels peuvent donner lieu les conducteurs concentriques insuffisamment isolés l'un de l'autre, quelques firmes recommandent de poser chaque conducteur dans un tube spécial. Ce dernier procédé est plus sûr encore que la pose sous moulures, attendu que le bois devient souvent humide et donne une fausse sécurité d'isolement lorsque la gaîne diélectrique du cuivre n'est pas imperméable.

Lorsque les câbles traversent des murs ou des planchers, on les revêt d'un tube de porcelaine, de verre, d'ébonite ou de papier comprimé qu'on protège par un tuyau en cuivre ou en fer. Ces tubes sont prolongés de 25 cm au-dessus des planchers, pour éviter le contact de l'humidité et le frottement des appareils de nettoyage. Aux croisements des conducteurs, ceux-ci sont protégés par une garniture supplémentaire.

Le tableau de la page suivante résume les prescriptions recommandées dans les installations d'éclairage, en ce qui concerne les revêtements des conducteurs.

On défend le retour par la terre dans les circuits d'éclairage, afin de diminuer les chances de dérivations et de courts-circuits. Les circuits doivent être complètement métalliques et isolés avec soin. Il existe cependant des exceptions à la règle précédente ; ainsi lorsqu'on fait usage de câbles concentriques, on relie parfois le conducteur extérieur à la terre, afin de pouvoir toucher ce conducteur sans inconvénient. Dans les distributions à trois fils, le conducteur neutre est parfois aussi relié au sol, pour éviter que la tension ne dépasse 110 volts dans les maisons, ce qui arriverait si l'un des conducteurs extrêmes touchait à la terre.

| SPÉCIFICATION des CONDUCTEURS. | MODES D'EMPLOI. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *Dans les planchers ou les lambris.* | *A l'extérieur des habitations.* | *Dans les locaux secs.* | *Dans les locaux humides.* | *Dans les locaux chargés de gaz ou de vapeurs.* | *Sur les lustres et appliques.* |
| Fils de cuivre nu. | Emploi défendu. | Sur isolateurs en porcelaine. | Emploi défendu. | Emploi défendu. | Emploi défendu. | Emploi défendu. |
| Fils de cuivre étamé à enveloppe de coton ou de jute. | Id. | Id. | Sur isolateurs en porcelaine. | Id. | Id. | Id. |
| Fils de cuivre étamé avec enveloppes successives de coton, de caoutchouc, d'un ruban de coton et de jute goudronné. | Placés dans des moulures sèches avec circulation d'air. | Id. | Sur isolateurs ou sous moulures. | Sur isolateurs en porcelaine. | Sur isolateurs en porcelaine. | A l'intérieur des tuyaux ou fixés à l'extérieur par une bande isolante ou une bande métallique. |
| Fils de cuivre étamé isolés sous plomb. | Emploi défendu. | Avec interposition d'un corps mou entre le câble et son attache en bois ou en métal. | Sur lattes en bois avec interposition d'un corps mou dans l'attache. | Emploi défendu. | Id. | Emploi défendu. |
| Fils de cuivre isolés avec enveloppe de plomb et une tresse de jute goudronné sur celui-ci. | Dans des tubes métalliques. | Attaches en métal ou en bois. | Id. | Avec attaches métalliques étamées. | Id. | A l'intérieur des tuyaux ou fixés à l'extérieur par une bande métallique ou isolante. |
| Câbles isolés sous plomb avec armature métallique. | Peuvent être placés directement. | Id. | Id. | Id. | Id. | Id. |

En ce qui concerne la résistance d'isolement, § 553, exigée des conducteurs, les prescriptions varient. Parfois, on requiert qu'en reliant les conducteurs au sol à travers un galvanomètre, le courant dérivé n'atteigne pas une valeur dépassant 0,0001 du courant total utilisé par l'installation ou l'immeuble desservi. D'autres fois, on fixe des minima de résistance d'isolement dépendant de la longueur totale des conducteurs posés. Telle est la règle adoptée par la Compagnie des usines centrales de Berlin, qui impose les résistances suivantes dans lesquelles on doit comprendre tous les interrupteurs, foyers et autres appareils intercalés dans les circuits.

| LONGUEUR DES CONDUCTEURS POSÉS, EN MÈTRES. | RÉSISTANCE MINIMA A L'ISOLEMENT, EN OHMS. |
|---|---|
| Sous 200 | 300 000 |
| 200 à 300 | 200 000 |
| 300 à 500 | 100 000 |
| 500 à 750 | 80 000 |
| 750 à 1 000 | 60 000 |
| 1 000 à 1 500 | 40 000 |
| 1 500 et plus | 30 000 |

Dans un autre cas, on a imposé une résistance minima de 100 000 ohms par kilomètre de conducteurs, en spécifiant un minimum de 500 000 ohms pour chaque appareil pris isolément.

Dans les locaux humides, on exige que les conducteurs aient une gaîne isolante présentant *sous l'eau* une résistance de 300 megohms par km.

Lorsqu'on fait usage de matières vulcanisées dans l'enveloppe isolante, le cuivre doit être étamé pour éviter sa sulfuration.

Les joints des conducteurs doivent être aussi peu nombreux que possible. On les soude à la résine et on protège la soudure par une couverture isolante faite avec des soins minutieux. C'est souvent par les joints que les installations laissent à désirer. Sur les câbles revêtus d'une simple enveloppe de coton, les joints soudés sont recouverts d'une bande de coton imbibé d'un enduit poisseux qui assure l'adhérence de la couverture.

Si les câbles sont protégés par du caoutchouc, il faut enrouler autour du joint autant de couches de caoutchouc naturel et de caoutchouc vulcanisé qu'en comporte la gaîne. Ces couvertures, faites de ruban, sont soudées par du caoutchouc dissous dans la benzine. Une lanière bitumée protège le joint.

Les circuits dérivés doivent être protégés par des coupe-circuits disposés près des points de raccord des conducteurs de sections inégales. Si l'on ne rapproche pas les fils de sûreté des points de raccord, un court-circuit peut se produire en avant du coupe-circuit sans que ce dernier fonctionne. Il convient d'intercaler un fil de sûreté sur le conducteur d'aller et un autre sur le conducteur de retour. En ne protégeant qu'un des conducteurs seulement, il peut arriver que, dans deux circuits présentant des parties parallèles, les fils fusibles soient l'un sur le fil d'aller, l'autre sur le fil de retour. Si les deux fils non garantis viennent à se toucher accidentellement, un courant dangereux prend naissance sans que les appareils de sûreté fonctionnent aux points de dérivation.

On admet qu'un coupe-circuit est nécessaire dans tout circuit dérivé alimentant plus de 5 lampes à incandescence de 16 bougies. On groupe ces fils fusibles sur des tableaux secondaires, d'où partent des circuits alimentant 5 lampes. Lorsqu'on fait usage de lampes portatives et de fils flexibles, un coupe-circuit est, en outre, indispensable au raccord du cordon souple avec la conduite fixe. Les lampes à incandescence suspendues possèdent, par exemple, un fil de sûreté dans la rosace du plafond.

Les plombs de sûreté doivent fondre pour un courant dépassant de 50 à 100 pour 100 l'intensité normale. Il convient que les supports des coupe-circuits portent l'indication du courant pour lequel ceux-ci fonctionnent. Il est, en outre, désirable que les plombs de sûreté soient montés dans des gaînes qui ne s'adaptent qu'aux supports portant l'indication correspondant à la section de ces plombs. De cette manière, on évite qu'un ouvrier peu soigneux ou mal avisé ne remplace un fil de sûreté fondu par un autre de section trop forte.

Les commutateurs, interrupteurs et coupe-circuits doivent être construits de telle sorte qu'il ne puisse pas se produire d'arc voltaïque permanent entre les pièces métalliques qui les composent. Dans ce but, l'écartement de celles-ci est en rapport avec la tension électrique et un ressort ou tout autre dispositif empêche les pièces mobiles de rester dans une position intermédiaire entre les positions extrêmes.

Les interrupteurs et les coupe-circuits sont munis de supports et de couvercles incombustibles. Il est bon de n'admettre dans les

commutateurs et interrupteurs que les contacts à frottement. La surface de contact doit être calculée pour une densité maxima de 0,2 ampère par $mm^2$. Les interrupteurs des circuits à haute tension sont toujours doubles de manière à couper à la fois les deux branches de chaque circuit et à éviter qu'une tension élevée ne persiste sur l'une d'elles. Ces interrupteurs sont construits de telle façon qu'on ne puisse toucher les blocs de contact et autres parties de circuit sans démonter l'appareil.

Les lampes à arc sont protégées par des globes avec cendriers, afin d'éviter la chute de particules de charbon incandescentes. On spécifie fréquemment que l'absorption par les globes ne doit pas dépasser 0,25 de la lumière qui les traverse. Si les arcs sont alimentés par des courants de haute tension, il convient d'isoler du circuit les pièces métalliques extérieures, de crainte d'accidents.

Dans le montage des lampes à incandescence, on emploie souvent les appareils à gaz, lustres, appliques, en guise de supports pour les conducteurs. Cette disposition expose à des dérivations vers la terre. Pour empêcher ces dernières, on isole ces appareils de la conduite générale par une rondelle de fibre interposée dans le joint des tuyaux et percée de manière à ne pas gêner le passage du gaz.

Les conducteurs servant à alimenter une lampe électrique ne doivent jamais servir à la suspendre, ni à supporter un poids quelconque. On utilise, à cette fin, des fils ou des câbles métalliques auxiliaires.

Les résistances artificielles ajoutées aux lampes, ainsi que celles introduites dans le circuit des inducteurs des machines, sont éloignées de toute matière combustible et disposées de manière à permettre la circulation de l'air autour des fils.

Le circuit primaire d'un transformateur doit être soustrait à l'accès du public et une disposition est prise pour que, si un contact se produit avec le circuit secondaire, la tension ne puisse devenir dangereuse dans ce dernier. La distance entre les circuits primaires et secondaires doit être d'au moins 1 cm, §§ 454 et 499. Les transformateurs disposés à l'intérieur des habitations doivent être placés dans des caisses incombustibles.

Les dynamos ont leurs boulons de serrage isolés du massif

des fondations en vue de diminuer les chances de contact avec la terre. Il faut éviter de les installer dans des lieux humides.

Les accumulateurs seront disposés sur des étagères, supportés par des isolateurs en verre ou en porcelaine.

A l'entrée dans les bâtiments, les fils aériens doivent être protégés par des coupe-circuits et des parafoudres, §§ 477 et 478. Les fils d'introduction passent dans des tubes en porcelaine terminés extérieurement par un entonnoir recourbé vers le bas et destiné à éviter l'accès de l'humidité.

762. — **Câbles aériens dans les villes. Règlement du Board of Trade.** — Lorsque dans les villes, les câbles aériens transportent des courants de tension élevée, 1000 à 2000 volts par exemple, des précautions spéciales sont prises pour éviter des accidents. Généralement, on entoure ces conducteurs d'une gaîne isolante continue et, afin qu'ils n'aient à supporter aucun effort, on les suspend à des fils d'acier ou de bronze fixés aux supports par l'intermédiaire d'isolateurs. Le conducteur est suspendu à son fil de soutien par des brins verticaux, échelonnés sur sa longueur de telle manière qu'entre deux brins successifs, il ne se produise pas de flèche sensible dans le conducteur. Dans ces conditions, on peut considérer la charge comme uniformément répartie sur le câble de support et calculer ce dernier d'après les formules posées précédemment, en adoptant le coefficient de sécurité prescrit par les règlements.

Nous donnons ci-après les règles imposées par le Ministère du Commerce anglais (Board of Trade) pour assurer la sécurité des personnes et pour protéger les lignes télégraphiques considérées comme d'utilité publique. Dans ce qui suit, il ne s'agit que des conducteurs destinés aux usages industriels (éclairage, puissance motrice, etc.).

1° Un conducteur aérien ne sera jamais posé à moins de 6 m du sol et, lorsqu'il traverse une rue, à moins de 9 m du sol. A part les cas où un conducteur prend appui sur une maison ou pénètre dans celle-ci, il sera éloigné des habitations d'au moins 1,80 m.

2° La distance des supports des conducteurs aériens n'excédera pas 60 m quand la canalisation est rectiligne et 45 m lorsque la ligne fait un coude.

3° Les supports des conducteurs aériens seront construits à l'aide de matériaux durables et seront convenablement garantis contre les efforts occasionnés par le vent, les coudes de la ligne ou les portées inégales de celle-ci.

Les fils de support des câbles seront fixés par des isolateurs aux points d'appui.

Le coefficient de sécurité admis dans les calculs de résistance sera au moins égal à 6 pour les fils suspendus et à 12 pour les supports, en adoptant comme pression maxima du vent 250 kg par $m^2$. Aucune précaution additionnelle ne devra être prise contre l'accumulation de la neige

4° Chaque support, s'il est en métal, sera relié à la terre. Les supports en bois ou autre matière non conductrice seront protégés contre la foudre par un paratonnerre fixé au support sur toute sa longueur et dépassant le support à la partie supérieure d'une hauteur d'au moins 15 cm.

Un support est considéré comme bien connecté à la terre quand il communique avec une conduite d'eau alimentaire extérieure aux habitations ou, si cet arrangement n'est pas possible, avec une masse métallique, ayant au moins 0,37 $m^2$ de surface, enfouie à une profondeur d'au moins 0,92 m dans la terre humide, pourvu que dans chaque cas le fil de connexion possède une tenacité et une conductibilité équivalentes à celles d'une corde comprenant 7 fils de fer galvanisé de 1,6 mm de diamètre.

5° Chaque conducteur aérien doit être protégé à ses extrémités par des parafoudres du modèle approuvé par le Ministère du Commerce.

6° Quand un conducteur traverse une rue, l'angle compris entre le conducteur et la direction de la rue ne sera pas moindre que 60 degrés et la portée sera aussi faible que possible.

7° Quand un conducteur aérien croise d'autres conducteurs, des précautions doivent être prises pour empêcher un contact en cas de rupture ou d'affaissement.

8° Le courant de travail maximum dans un conducteur aérien sera insuffisant pour provoquer une élévation de température de 17° C et pour altérer les isolants s'il en existe. Des précautions seront prises pour que le circuit soit rompu automatiquement si

ce courant maximum est dépassé de 25 pour cent, même pendant un court intervalle de temps.

9° Les conducteurs transportant l'électricité à haute tension auront une gaîne isolante continue, dont l'épaisseur ne sera pas inférieure à 2,5 mm. Dans le cas où la tension dépasse 2 000 volts, l'épaisseur de la gaîne, exprimée en mm, doit être égale au nombre de volts divisé par 800. La gaîne sera protégée extérieurement contre l'usure. Si l'armature protectrice est métallique, elle doit être reliée à la terre.

10° La matière utilisée pour l'isolement d'un conducteur à haute tension ne pourra pas présenter de changements de structure entre — 12° C et 75°5 C ni être altérée par l'atmosphère ambiante.

11° La résistance d'isolement d'un circuit aérien à haute tension, y compris tous les appareils inclus dans ce circuit, sera telle que, si l'on réunit un point quelconque du circuit à la terre, le courant de perte n'excède pas $^1/_{25}$ d'ampère dans le cas de courants continus et $^1/_{50}$ d'ampère dans le cas de courants alternatifs. Chaque circuit contenant des conducteurs à haute tension sera pourvu d'un indicateur accusant toute perte supérieure à celles indiquées ci-dessus.

12° Tout conducteur aérien à haute tension sera suspendu à un fil de support par des brins isolés assez rapprochés pour que le poids du conducteur ne détermine pas de flèches sensibles. Les fils de soutien seront fixés à leurs supports par des isolateurs, de telle manière qu'en cas de bris de ceux-ci les fils ne puissent choir du support.

13° Dans le cas de conducteurs aériens transportant des courants alternatifs, les deux fils constituant le circuit seront tendus parallèlement à une distance ne dépassant pas 45 cm.

14° Les propriétaires de conducteurs aériens seront garants de l'efficacité des supports, lesquels porteront une marque spéciale apposée par le Ministère du Commerce.

15° Les supports, les conducteurs et les appareils reliés à ces derniers seront surveillés et entretenus par les propriétaires au double point de vue électrique et mécanique.

16° Aucun conducteur aérien ne sera maintenu après qu'il a cessé de servir, à moins qu'il ne soit destiné à être réemployé à bref délai.

17° Dans la pose des conducteurs, on aura particulièrement égard aux circuits télégraphiques et toutes les précautions seront prises pour éviter les effets d'induction ou autres sur ces derniers.

18° Une notice avec plan de la pose des conducteurs doit être remise au Ministre des Postes et Télégraphes. Celui-ci peut requérir telles modifications qu'il juge convenables pour protéger ses lignes ou ses employés.

763. — **Distribution urbaine. Choix du système.** — Le projet d'une distribution urbaine rencontre toutes les difficultés que peuvent présenter les installations d'éclairage. Nous indiquerons les principales règles qui président à un travail de ce genre. Si l'on a le choix entre divers systèmes, la première question qui se pose est la recherche du mode de distribution à adopter. On se guidera, à cet égard, sur les considérations que nous avons développées dans la première partie de ce volume et qu'on peut résumer de la manière suivante. Une distribution directe s'indique lorsqu'on doit desservir une agglomération contenant une clientèle compacte; au contraire, une distribution indirecte convient si les abonnés sont clairsemés, si l'usine doit être reportée en dehors d'une agglomération étendue ou enfin si l'on utilise une chute d'eau à proximité de celle-ci.

Les statistiques des usines à gaz et des usines électriques existantes fournissent des indications précieuses au sujet de la répartition des abonnés dans les villes. Ainsi la Société des usines électriques de Berlin estime que, dans cette ville, on peut compter actuellement sur 1 lampe de 16 bougies par mètre courant de canalisation dans les rues principales et sur 1/2 lampe dans les rues secondaires. La clientèle de cette société se répartit comme suit. Sur 100 abonnés, il y a 10 cafés et restaurants, 34 magasins, 21 banques, 27 théâtres et seulement 8 maisons particulières et diverses. Eu égard au peu de lampes placées chez les particuliers, la clientèle privée est donc d'un rapport minime pour une usine électrique.

A Newcastle la proportion est la suivante : 56 cafés et restaurants, 17 bureaux, 15 boutiques et 12 habitations privées.

M. Picou répartit ainsi, sur 100 abonnés, la clientèle d'une ville de 150 000 habitants en France : 28 cafés et cercles,

21 ateliers, 27,5 boutiques, 7,5 bureaux et appartements, 16 théâtres et salles de concert.

Il est très important de connaître approximativement, pour un réseau comportant un nombre de lampes déterminé, la charge maxima de l'usine, c'est à dire le nombre maximum de lampes allumées simultanément pendant la soirée la plus longue. Ce nombre fixe la puissance de l'usine, réserve non comprise. Celle-ci doit être estimée très largement pour parer aux demandes extraordinaires.

C'est encore l'expérience qui peut seule répondre à cette question.

Voici les résultats constatés dans quelques villes :

*Rapport du nombre maximum de lampes électriques allumées simultanément au nombre de lampes installées.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Kensington (Londres) | 0,40 | Breslau | 0,62 |
| Vienne | 0,52 | Darmstadt | 0,60 |
| Newcastle | 0,45 | Düsseldorff | 0,51 |
| Cologne | 0,70 | Hanovre | 0,55 |
| Berlin | 0,58 | Koenigsberg | 0,64 |
| Hambourg | 0,58 | Mulhouse | 0,46 |
| Barmen | 0,38 | Stettin | 0,61 |

Un autre renseignement utile au point de vue de la fixation des tarifs est la durée annuelle moyenne d'allumage de chaque lampe installée. Cette durée est considérable dans les quartiers commerçants ; elle est faible dans les quartiers dont la clientèle comprend un grand nombre de maisons fermées où l'on n'allume qu'une faible partie des lampes installées. Voici quelques exemples pris, à Londres, dans des réseaux dont il a été question au § 758 :

| | | | |
|---|---|---|---|
| St James | 935 heures. | House to house | 455 heures. |
| Westminster | 643 » | Chelsea | 350 » |
| Metropolitan | 550 » | Kensington | 345 » |

Dans le projet de l'usine on tiendra compte des considérations exposées au § 740.

**764. — Calcul d'un réseau urbain.** — Le calcul des canalisations doit être fait largement, en prévision du développement de la demande. Aussi, au début de l'installation, on pose ordinairement des conducteurs pouvant supporter un courant double du courant

requis, afin de ne pas avoir à retoucher à la conduite peu de temps après sa pose.

Dans la détermination des dimensions des conducteurs employés dans la canalisation, nous avons vu, §§ 474 et suivants, qu'on doit avoir égard aux conditions d'économie et de sécurité, tout en restant dans les limites de pertes de tension prescrites. En fait, avec les gros conducteurs, la densité de courant la plus économique est généralement voisine de celle qu'on peut tolérer au point de vue de l'échauffement des conducteurs, soit de 1 à 2 ampères par $mm^2$ de section, selon la nature du revêtement et le diamètre.

Si, en effet, on calcule, d'après le tableau de la page 508, le coefficient $n$ entrant dans l'expression du prix de la canalisation, on voit qu'il est voisin de 0,05 pour les câbles isolés. En estimant le taux d'intérêt et d'amortissement à 10 pour 100 ($a = 0,1$), la résistance spécifique du cuivre à $\rho = 1,7 \cdot 10^{-6}$ ohm-cm, le nombre moyen d'heures pendant lequel la canalisation fonctionne annuellement à 700 et, enfin, le prix de revient d'un watt-heure supplémentaire produit par l'usine à 0,00012 fr., la densité la plus économique est

$$\delta = \sqrt{\frac{n\,a}{\rho\,t\,p}} = \sqrt{\frac{0,05 \cdot 0,1}{1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 700 \cdot 0,00012}} = 187,$$

soit 1,87 ampère par $mm^2$.

Il faut noter que ce résultat se rapporte à la densité de courant moyenne calculée comme on l'a vu au § 476. Or, le courant maximum dépasse considérablement le courant moyen. Il s'ensuit que la règle de Thomson conduit à faire travailler le cuivre à la densité la plus haute compatible avec la conservation de la canalisation. Cette condition s'allie fort bien avec la tendance des compagnies d'électricité, qui cherchent à réduire autant que possible le poids des conducteurs, en vue de diminuer le capital immobilisé dans la canalisation.

Le système de distribution le plus employé est la distribution en dérivation avec feeders. Ce système s'applique aux modes d'alimentation directs comme aux modes d'alimentation indirects des lampes; dans ce dernier cas, les feeders alimentent le réseau primaire. Pour préciser, considérons une ville à éclairer par une usine centrale, à l'aide du système à trois conducteurs, § 485. La

canalisation comprend des distributeurs longeant les rues et raccordés entr'eux à chaque carrefour, de manière à former les mailles d'un réseau. Ce dernier est alimenté par un certain nombre de feeders rayonnant de l'usine et maintenant une tension invariable aux points de jonction avec les distributeurs. Les chutes de tension tolérées en général sont de 1,5 pour 100 dans les distributeurs et de 5 à 20 pour 100 dans les feeders. Dans les rues très larges et sur les places publiques, on dispose parfois deux artères distributrices, une sous chaque trottoir.

Connaissant la densité maxima admise dans les conducteurs (souvent 2 ampères par $mm^2$), on n'aura aucune peine à calculer les distributeurs propres à fournir le courant demandé par les divers branchements d'abonnés, figurés au préalable sur le plan de la ville. Dans ce but, on part d'une boîte de jonction qu'on considère comme une source d'énergie électrique à tension invariable capable d'entretenir les lampes situées dans un district dont on calcule les dimensions de telle sorte que la chute de tension n'y dépasse pas 1,5 pour 100 lorsque les 2/3 des lampes sont allumées, cette fraction représentant le maximum de la demande courante. On arrive ainsi à une perte limite de 3,3 volts dans une distribution à 220 volts. Le conducteur neutre reçoit une section moitié moindre que celle des conducteurs extrêmes. Dans une distribution à 220 volts, les blocs de maisons ainsi limités ont, en général, de 150 m à 300 m de côté.

On a soin d'indiquer, sur un plan de la ville, les limites de chaque district desservi par un faisceau de feeders, les divers districts étant d'ailleurs contigus et réunis entr'eux. Reste alors le calcul des alimentateurs, qui se composent de deux conducteurs extrêmes et d'un conducteur neutre de section moitié moindre. Ces feeders se placent, dans les tranchées, à côté des distributeurs, en suivant la voie la plus courte entre l'usine et les divers districts. D'ordinaire, afin de pouvoir coupler toutes les machines en dérivation, on réunit les bouts correspondants de tous les feeders à l'usine. La chute de tension devant être la même dans les diverses artères (5 à 20 pour 100 au maximum), il faut que celles-ci aient des résistances calculées d'après l'équation

$$r = \frac{0{,}05 \text{ ou } 0{,}2\, e}{i},$$

*e* étant la tension de distribution et *i* le courant correspondant aux 2/3 des lampes du district à desservir. Comme, en général, les divers districts renferment des nombres de lampes peu différents, la densité de courant dans les feeders sera d'autant moindre que ceux-ci s'écartent davantage de l'usine. Si le calcul conduisait à une densité dangereuse pour les feeders les plus courts, plus de 3 ampères par $mm^2$ par exemple, il conviendrait d'accroître la section de ceux-ci et de parfaire la résistance calculée par des bandes de nickeline ajoutées en série avec ces feeders à l'usine. Ces diverses estimations admettent une tolérance d'environ 5 pour 100.

On tracera, sur le plan de la ville, les diverses conduites calculées, en notant, à côté de chaque conducteur, la valeur de la section. Pour distinguer les feeders des distributeurs et des branchements, on emploiera des traits de couleurs différentes. Les boîtes de jonction des feeders avec le réseau seront également distinguées des boîtes de raccord des distributeurs entr'eux.

On dressera des tableaux comportant une énumération ordonnée des conducteurs employés dans les diverses parties du réseau et mentionnant leurs sections, leurs compositions (barres, cordes de cuivre, nombre et sections des brins) et leurs poids.

Dans le calcul du réseau primaire d'une distribution par transformateurs, on suivra une marche analogue à la précédente. La chute de tension tolérée dans les feeders est alors très faible, eu égard à la petitesse des courants qui les traversent. Parfois, lorsque le rayon de distribution est peu considérable, la chute est inférieure à 1,5 pour 100 dans les feeders et les distributeurs réunis.

Pour le choix du système de canalisation, on se guidera d'après les indications données aux §§ 530 et suivants.

765. — **Méthode de sectionnement de MM. Herzog et Stark pour le calcul des réseaux.** — Parfois, entre deux boîtes de jonction des feeders, il existe plusieurs distributeurs branchés ou formant des figures fermées. Pour arriver à calculer les courants circulant dans le réseau plus rapidement que par l'application des

lois de Kirchhoff, MM. Herzog et Stark (1) emploient une méthode dite de *sectionnement.*

On suppose que chaque distributeur est coupé en un des branchements et on admet par la pensée que l'électricité qui affluait par les deux tronçons ou retournait par l'un d'eux est absorbée ou développée par un moyen quelconque. Les points de séparation sont choisis de manière que toutes les branches sectionnées du réseau restent en communication avec l'un des feeders par lesquels arrive le courant. On considère comme inconnus les courants $\alpha$, $\beta$, etc., qui affluent aux points de sectionnement ou qui s'en éloignent. On obtient des équations propres à déterminer ces courants en écrivant que la tension est la même des deux côtés de chaque section, c'est à dire que la chute de tension à partir d'un point de distribution jusqu'au point de séparation est égale le long des deux chemins qui relient ces points. Connaissant les courants $\alpha$, $\beta$, etc., il est facile de déterminer les points de partage sur les distributeurs ; il suffit de suivre ceux-ci jusqu'à ce qu'on arrive à un branchement pour lequel les deux courants qui y aboutissent ont une valeur positive. On cherche alors les pertes de tension qui sont maxima aux points de partage.

Les valeurs de $\alpha$, $\beta$, etc. permettent de déterminer les intensités maxima des courants dans les diverses branches du réseau, produites par la mise en train ou l'arrêt de récepteurs. En effet, ces variables sont exprimées par des sommes de termes positifs et de termes négatifs. En égalant les termes négatifs à zéro, on aura un maximum positif. Le maximum du courant inverse correspondra à une valeur nulle des termes positifs.

Afin d'élucider la méthode de MM. Herzog et Stark, nous donnons au complet l'application suivante qui en a été faite par M. Centurione (2).

Soit en A, fig. 515, le point d'arrivée du courant électrique dans un

(1) *La Lumière Électrique,* t. 36, 10 mai 1890.

(2) *Bull. de l'Ass. des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut Montefiore,* 1890.

réseau fermé de distributeurs raccordés entr'eux en des points A, B, C, D, E.

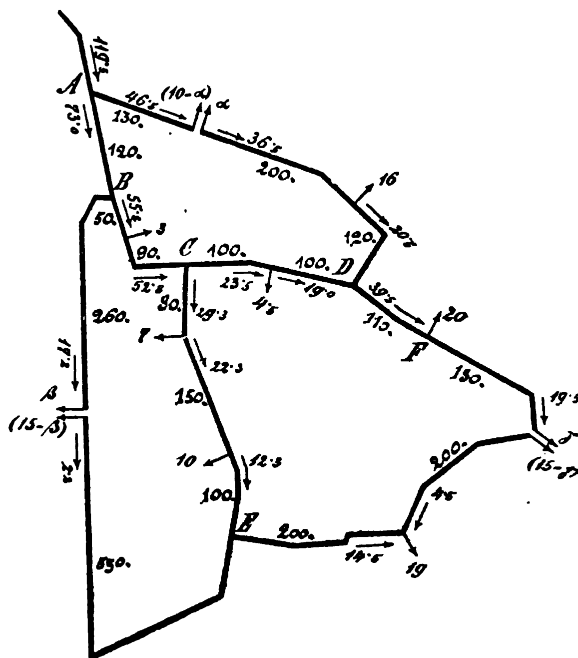



Fig. 515.

Nous ne considérons que des conducteurs simples dont il suffit d'ailleurs de doubler la résistance pour tenir compte du circuit complet. Admettons que les longueurs soient exprimées en mètres et les sections en mm².

On se donne arbitrairement une première distribution de courants dans le réseau d'après laquelle l'on choisit les sections des conducteurs de manière à ne pas dépasser une chute de potentiel égale à 3 pour 100 de la tension utile. On vérifie cette distribution par la méthode de sectionnement.

Soient α, β, γ les points de sectionnement ; les flèches perpendiculaires aux conducteurs indiquent l'emplacement et les chiffres qui les accompagnent l'intensité, en ampères, des dérivations correspondant à des groupes de lampes.

Comme nous avons choisi $\alpha$ précisément en un point où il y avait une dérivation de 10 A, nous pouvons admettre que ces 10 A étaient constitués d'une partie $\alpha$ venant de D et d'une partie $10 - \alpha$ émanant de A.

De même en $\beta$, le courant dérivé de 15 A provient d'une somme de deux parties, $\beta$ issue de B et $15 - \beta$ de E. La même chose existe pour le point $\gamma$.

De A jusqu'au sectionnement $\alpha$, nous pouvons calculer les pertes de potentiel le long des deux chemins A, $10 - \alpha$ et A, B, C, D, $\alpha$, et poser qu'elles sont égales.

La conductibilité du métal et le facteur de multiplication 2 qui tient compte du distributeur de retour intervenant dans les deux membres, nous nous abstiendrons de les écrire ; en outre, au lieu des longueurs et des sections, nous indiquerons directement les valeurs du rapport de ces quantités.

En admettant que les longueurs, en mètres, soient celles inscrites sur la figure et que les conducteurs aient les sections suivantes, exprimées en $mm^2$,

$$
\begin{aligned}
A\,\alpha\,D &= 50,\\
A\,B\,C &= 70,\\
C\,D\,F &= 50,\\
F\,\gamma &= 30,\\
B\,\beta\,E\,\gamma &= 20,\\
C\,E &= 30
\end{aligned}
$$

pour les 80 premiers et les 100 derniers mètres, et 50 pour les 150 mètres intermédiaires, nous pouvons écrire pour le point $\alpha$ l'équation :

$$
2{,}6\,(10 - \alpha) = 1{,}71 \times \beta + 2{,}42 \times 3 + 3{,}7\,(7 + 10 + 19 + 15 - \gamma + 15 - \beta) + 5{,}7 \times 4{,}5 + 7{,}7\,(20 + \gamma) + 10{,}1 \times 16 + 14{,}1 \times \alpha.
$$

Vers $\beta$, nous avons, à partir de B, les deux chemins B, $\beta$ et B, C, E, $(15 - \beta)$ qui nous fournissent l'équation

$$
13 \times \beta = 0{,}71 \times 3 + 1{,}99\,(4{,}5 + 16 + \alpha + 20 + \gamma) + 4{,}65 \times 7 + 7{,}65 \times 10 + 10{,}98\,(19 + 15 - \gamma) + 37{,}48\,(15 - \beta).
$$

De même, pour $\gamma$, en partant de C,

$$
2 \times 4{,}5 + 4\,(16 + \alpha) + 6{,}2 \times 20 + 12{,}2 \times \gamma = 2{,}66 \times 7 + 5{,}66 \times 10 + 9\,(15 - \beta) + 19 \times 19 + 29\,(15 - \gamma).
$$

En résolvant ces trois équations, nous obtenons

$$\alpha = -36,5$$
$$\beta = \quad 17,2$$
$$\gamma = \quad 19,5.$$

La valeur négative représentant une intensité de sens contraire à celui supposé, le courant $\alpha$ s'éloigne du point désigné par la même lettre.

A l'aide de ces trois données, la répartition des courants est précisée. On connaît ainsi le sens et l'intensité de ceux-ci dans chaque portion du réseau; les valeurs sont inscrites sur la figure à côté des flèches parallèles aux conducteurs. On en déduit les pertes de charge en volts. Si celles-ci ou les densités de courant sont trouvées trop fortes dans quelques conducteurs, on modifiera convenablement les sections et recommencera les calculs de vérification.

Mais un réseau ne se trouve pas toujours dans les conditions de pleine charge que nous avons supposées. A certaines heures de la journée, une partie seulement du réseau est utilisée, et il arrive que, pendant qu'un conducteur travaille à plein débit, le conducteur voisin n'est parcouru que par un courant très faible. Il faut donc rechercher l'influence qu'exerce sur le réseau entier la fluctuation du courant dans ses différentes parties. MM. Herzog et Stark ont mis à profit dans ce but le principe de la superposition des effets, en remarquant que le courant engendré dans une partie du réseau par la fermeture simultanée de plusieurs circuits d'utilisation est égal à la somme des courants qui y seraient déterminés par l'adjonction successive de ces circuits.

Pour appliquer ce principe, considérons une dérivation d'une valeur convenable, de 10 A par exemple, et établissons-la successivement aux différents nœuds du réseau : pour chacune de ces positions, nous aurons dans les différents conducteurs une certaine répartition de courants et, pour connaître les valeurs de ceux-ci, nous pouvons employer la méthode de sectionnement précédemment décrite.

Nous obtiendrons ainsi autant de systèmes d'équations qu'il y a de nœuds et leur résolution nous permettra de déterminer le courant qui circule dans l'un quelconque des conducteurs, quand la dérivation occupe l'un quelconque des nœuds du réseau.

Alors on dressera des tableaux graphiques composés d'autant de diagrammes qu'il existe de conducteurs.

Dans chaque diagramme, on représentera par une horizontale la résistance du conducteur correspondant et on portera sur deux perpendiculaires élevées aux extrémités de cette droite des longueurs proportionnelles aux intensités des courants que reçoivent les autres conducteurs quand la dérivation est supposée successivement aux deux extrémités du conducteur considéré.

Reprenons notre exemple, fig. 516. Établissons le courant dérivé unitaire de 10 A premièrement en B, toutes les autres dérivations étant supprimées : ouvrons les mailles du réseau en des

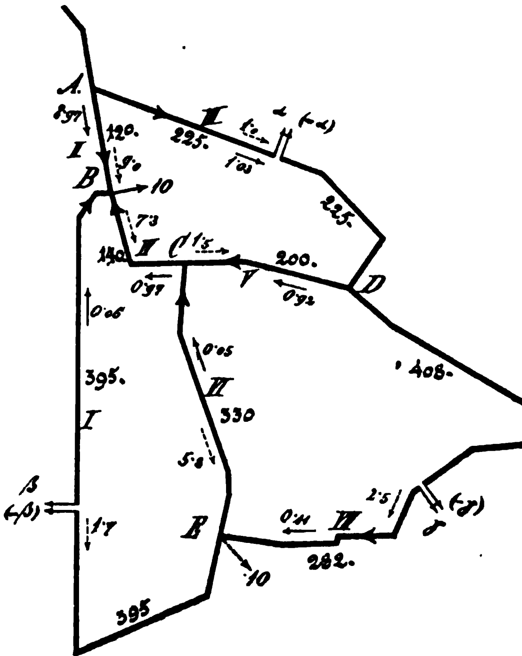


Fig. 516.

points α, β, γ choisis arbitrairement. Les longueurs sont indiquées sur la figure, les sections sont les mêmes qu'auparavant. Nous pouvons écrire les trois équations :

$$4{,}5\,\alpha = 1{,}7\,(10 + \beta) + 3{,}7\,(\gamma - \beta) + 7{,}7\,(-\gamma) + 12{,}2\,(-\alpha),$$

$$20\,\beta = 2\,(-\alpha - \gamma) + 11\,\gamma + 31\,(-\beta),$$

$$4\,(-\alpha) + 18\,(-\gamma) = 9\,(-\beta) + 23\,\gamma;$$

d'où l'on tire les inconnues

$$\alpha = 1{,}03$$
$$\beta = -0{,}06$$
$$\gamma = -0{,}11.$$

On déduit de ces valeurs la répartition du courant, indiquée par les flèches en traits pleins.

Transportant la dérivation unique de 10 A au point E et établissant les équations, on trouve, en les résolvant,

$$\alpha = 1$$
$$\beta = 1{,}7$$
$$\gamma = -2{,}5$$

et une distribution du courant dans le réseau indiquée par les flèches pointillées.

Avec ces données, on peut déjà construire le diagramme du conducteur B E.

Dans la fig. 517 la droite BE représente la résistance de ce conducteur.

Sur la perpendiculaire élevée au point B, portons des longueurs B I, B II, ... BVII proportionnelles aux courants que nous avons reconnus dans les conducteurs marqués I, II, ... VII sur la fig. 516 quand la dérivation de 10 A était en B : ayons soin de porter ces longueurs au-dessus ou au-dessous de la droite BE, suivant que les courants correspondants sont de même sens ou de sens contraire à celui de flèches marquées arbitrairement sur les conducteurs.

Sur la perpendiculaire de l'extrémité E, faisons la même chose pour la position E de la dérivation.

Joignons les points I I, II II, ... VII VII ainsi obtenus par des droites. En faisant passer de proche en proche la dérivation unitaire de B en E le long du conducteur I de la fig. 516, les courants qui parcourent les autres conducteurs sont déterminés à chaque instant par les longueurs, comptées à partir de l'horizontale, que les lignes I I, II II, ... VII VII découpent sur une verticale MN se mouvant proportionnellement le long de la droite BE de la fig. 517.

Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que le rapport de

la variation d'un des courants, $\alpha$ par exemple, à la variation de la résistance $r$ du conducteur BE comprise entre le point B et la

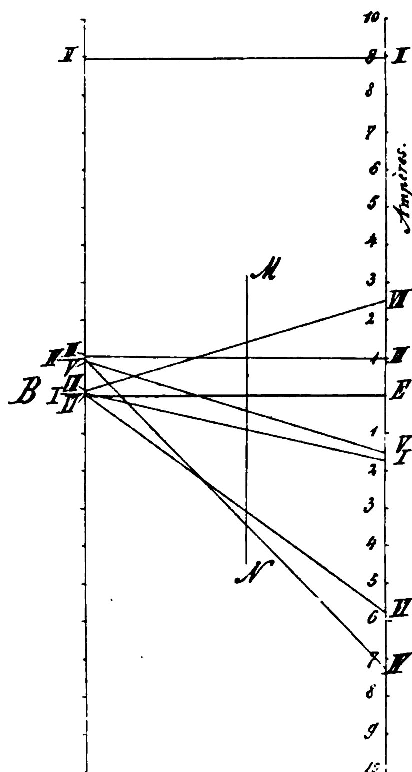


Fig. 517.

position actuelle de la dérivation unitaire est une constante ; c'est à dire que

$$\frac{d\alpha}{dr} = \text{constante}.$$

En effet, la résistance $r$ entre dans les équations qui expriment l'égalité des pertes de charge, sous la forme

$$\beta r - (10 - \beta)(R - r)$$

en admettant que R représente la résistance totale du conducteur BE, et que le sectionnement $\beta$ coïncide avec l'emplacement considéré de la dérivation de 10 A.

Or cette expression, qui devient

$$10\,r - 10\,R + \beta\,R,$$

renferme $r$ comme coefficient d'un terme constant. Donc, dans la résolution du système d'équations linéaires en $\alpha$, $\beta$, $\gamma$, $r$ apparaîtra seulement au numérateur des racines et y figurera au premier degré. La dérivée d'une telle fraction ne peut être qu'une constante, d'où il suit que la courbe qui représente la loi de variation est une droite.

On peut de cette façon se rendre un compte exact des changements que tout nouveau circuit dérivé sur I introduit dans la répartition du courant dans le réseau.

On construit un diagramme semblable pour chaque distributeur.

En résumé, la méthode de sectionnement donne à l'électricien le moyen de vérifier la convenance des sections choisies pour les différents conducteurs ; le principe de la superposition des effets lui permet de tenir compte des modifications introduites dans le réseau pendant l'exécution des travaux et de suivre, pendant l'exploitation, les fluctuations journalières et annuelles du courant dans les différentes parties du réseau.

**766. — Méthode approximative de M. Cruciani.** — La méthode de MM. Herzog et Stark, à côté de l'avantage de la rigueur, présente quelques défauts qui limitent son application. Elle est très laborieuse et ne permet d'apercevoir une erreur, même grossière, qu'après achèvement complet des calculs. Elle suppose connues les sections des câbles et, comme la distribution des courants se déduit des calculs, il arrive qu'après avoir terminé ceux-ci on doive les recommencer avec des câbles différents parce que la densité de courant obtenue est trop forte ou trop faible.

M. Jos. Cruciani, ingénieur-électricien à la Compagnie *Helios*, emploie pour le calcul des réseaux une méthode par approximations successives beaucoup plus expéditive que la précédente et présentant une exactitude bien suffisante pour les applications.

Etant donnés la position et l'importance des branchements à desservir par un réseau de câbles, ainsi que les sections des conducteurs dont il peut disposer, un praticien n'a pas de peine à déterminer d'une manière grossière l'intensité des courants qui

circulent dans les divers côtés du réseau et à choisir les sections de câble à adopter dans ces côtés. Ces éléments permettent de calculer les pertes de tension successives à partir du point d'alimentation jusqu'aux points de partage supposés des courants. Les pertes ainsi trouvées ne sont pas les mêmes pour les deux chemins qui conduisent dans chaque maille du point de départ au point d'arrivée. Les différences montrent dans quel sens il faut corriger la distribution des courants et, au besoin, la section des conducteurs pour arriver à un résultat satisfaisant. Avec une certaine habitude, celui-ci est atteint après un ou deux tâtonnements que l'emploi de la règle à calcul rend très rapides.

Un exemple fera mieux comprendre le procédé de M. Cruciani.

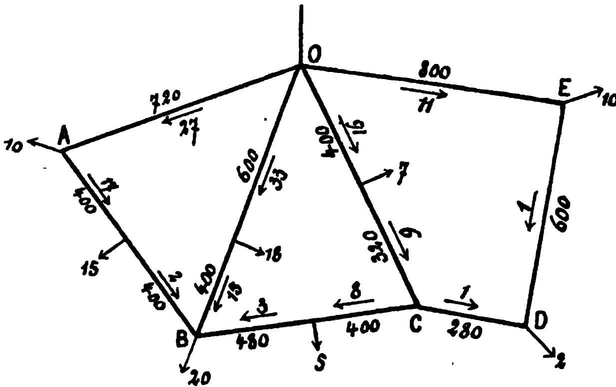



Fig. 518.

On se donne trois mailles à alimenter en un point O, fig. 518, par des courants alternatifs à la tension primaire de 1 000 V. Les modèles de câbles dont on peut disposer pour cette distribution ont respectivement 10, 16, 25, 35 et 50 mm² de section. La canalisation étant aérienne, on désire que la densité des courants soit voisine de 1 A par mm². La perte de tension admise est de 2 pour 100, soit 20 V.

La chute de tension dans chaque côté d'une maille supposé formé d'un conducteur d'aller et d'un conducteur de retour est $V = \Sigma\, ir = \Sigma \frac{i \times l\rho}{s}$, $l$ exprimant le double des distances réelles. Pour faciliter la pose, on donne une section constante $s$

à chaque côté du réseau, c'est à dire au distributeur traversant une rue; il s'ensuit que la perte dans un côté peut s'écrire

$$V = \frac{1}{s} \Sigma li\rho.$$

Si $l$ est exprimé en mètres, $s$ en mm² et $i$ en ampères, comme $\rho = 1{,}66$ mO-cm,

$$V = \frac{1}{s} \Sigma \frac{li}{60}.$$

La perte de tension par ampère moyen est égale à

$$e = \frac{1}{s} \Sigma \frac{l}{60}.$$

La figure indique les longueurs doublées des côtés du réseau ainsi que les positions et les intensités des branchements vers les transformateurs. Les flèches tracées le long des côtés du réseau représentent une distribution probable des courants dont l'intensité est présumée. On se donne les sections des conducteurs correspondant aux courants et l'on dresse le tableau suivant :

| COTÉS. | $s$ | $K = \Sigma \frac{li}{60}$ | V | $e$ | PERTES DE TENSION SUIVANT | | MOYENNES ARRONDIES. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| O A | 25 | 324 | 13 | 0,48 | O A B | 20,9 | |
| A B | 16 | 127 | 7,9 | 0,84 | O B | 12,3 | 16,5 |
| O B | 35 | 430 | 12,3 | 0,48 | O C B | 17,4 | |
| O C | 16 | 155 | 9,7 | 0,75 | O C D | 10,17 | 12,5 |
| C B | 10 | 77 | 7,7 | 1,47 | O E D | 15,60 | |
| C D | 10 | 4,7 | 0,47 | 0,47 | | | |
| O E | 10 | 146 | 14,6 | 1,33 | | | |
| E D | 10 | 10 | 1 | 1,00 | | | |

*Considérons les moyennes des pertes de tension suivant les divers chemins comme pertes existant dans la distribution réelle des courants*, et voyons les corrections qui en résultent dans la distribution présumée.

Dans la branche OE, où la perte résultant de l'hypothèse est 14,6 V, la chute de tension doit être diminuée de 14,6 — 12,5 = 2,1 V. Mais le tableau indique que, pour 1 ampère moyen, la

perte est de 1,33 V dans O E ; il faudra donc faire passer en moins un nombre d'ampères égal à $\frac{2,1}{1.33}$, soit 2 A environ. Il résulte de là que le point de partage est en E, et, par suite, 3 A viennent de C dans la direction C D. La perte totale sur C D E est alors $1,41 + 1 = 2,41$ V.

Quel courant doit parcourir la branche O C pour que la chute de tension suivant O C D E soit 12,5 V environ? Il reste $12,5 - 2,41 = 10,09$ pour O C, au lieu de 9,7 résultant de la première distribution. Or, la perte dans cette branche est, par ampère moyen, 0,75 ; d'où le nombre d'ampères supplémentaire $\frac{10,09 - 9,7}{0,75}$, soit 1 A environ.

Ainsi, le courant entrant dans O C est de 17 A. Puisque 3 A passent sur C D, 7 A se dirigent vers C B, de sorte que ce dernier côté contribue pour 2 A à l'alimentation de la dérivation B.

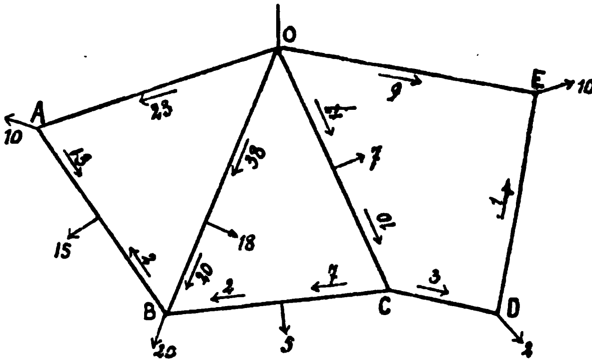



Fig. 519.

De la même manière, on vérifie aisément que le point de partage de la maille OAB est à la dérivation 15 A et que, pour donner à la perte depuis O jusqu'en ce point de partage la valeur moyenne 16,5, il faut qu'un courant de 23 A environ vienne de O et qu'un courant de 2 A afflue de B vers le même point de partage. Par suite, 38 A débouchent dans la branche O B.

La distribution des courants est ainsi devenue celle de la fig. 519. Cette nouvelle répartition donne sur OB une perte approximative de 15 V et sur OCB une perte de 16,7 V.

On pourrait recommencer les opérations en faisant les corrections pour arriver à la perte moyenne 15,8, mais ce n'est pas nécessaire pour les raisons suivantes.

On n'a pas tenu compte des dixièmes d'ampère dans le calcul ; on ne connaît jamais exactement la vraie position des prises de courant dans un réseau projeté ; les longueurs sont arrondies pour la commodité du calcul et on ajoute au moins 10 pour 100 pour tenir compte des erreurs des plans et des détours des câbles occasionnés par les obstacles rencontrés sous la voirie pour une ligne souterraine et au-dessus pour une ligne aérienne.

Avec des données aussi incertaines, la méthode approximative décrite est très suffisante. Outre sa rapidité, elle a sur la méthode de MM. Herzog et Stark l'avantage de fournir au cours du calcul des points de repère permettant de s'apercevoir de suite d'une erreur grossière. Elle permet d'assigner d'emblée la densité de courant sous laquelle les câbles travaillent. Enfin sa rapidité donne la possibilité d'étudier aisément pour un réseau plusieurs combinaisons de câbles et, par suite, de déterminer la combinaison la plus économique.

767. — **Raccordements privés.** — Après l'étude des réseaux urbains, il reste à considérer les raccordements des abonnés.

Dans les distributions à trois conducteurs, on a soin de relier les abonnés alternativement à l'un et à l'autre circuit. Les abonnés importants sont raccordés à la fois aux deux circuits ; ainsi l'on réduit autant que possible le courant dans le conducteur neutre.

La chute de tension maxima tolérée dans les installations privées est d'environ 2 pour 100, sauf dans les circuits des lampes à arc où la chute peut atteindre 15 à 20 pour 100. Les courants à admettre dans les conducteurs intérieurs sont au maximum ceux indiqués dans le tableau du § 474, lequel donne la perte de charge par kilomètre dans les fils des divers diamètres. Le mode d'isolement des conducteurs sera choisi d'après les indications mentionnées au § 761.

Au point de vue de la régularisation de la chute de tension dans les circuits dérivés d'une distribution intérieure, comme en ce qui concerne la facilité de pose et d'entretien d'une telle

distribution, il y a quelques dispositions que la pratique a sanctionnées.

Au début, on suivait dans la pose des conducteurs intérieurs les errements des gaziers. Un branchement ou colonne montante partant de la conduite de la rue traversait les divers étages du bâtiment à éclairer et, sur ce branchement, se greffaient les dérivations successives vers les lampes. Les coupe-circuits se disposaient au hasard en des endroits souvent peu accessibles ou près des interrupteurs, ce qui les éloignait des points de raccordement où ils doivent se trouver.

Actuellement, on procède comme suit. Des conducteurs relient le compteur à un tableau de distribution d'où partent des circuits alimentant chacun un groupe de 5 à 6 lampes et protégés au tableau par des coupe-circuits doubles faciles à inspecter.

Les lampes sont reliées à ces conducteurs par des fils plus minces. On calcule les conducteurs de manière à ce que la chute de tension totale ne dépasse pas les limites admises.

Dans une maison de grandeur moyenne, habitée par une seule famille, on dispose ainsi un tableau unique au rez-de-chaussée où l'on concentre les coupe-circuits et d'où partent les circuits de 5 à 6 lampes. On ne laisse de coupe-circuits isolés qu'à la base des conducteurs flexibles raccordés aux lampes. Dans une maison comprenant de nombreux appartements, il faut naturellement traiter chaque appartement comme une habitation distincte. On placera un tableau principal dans le sous-sol ou au rez-de-chaussée et des tableaux secondaires aux divers étages et, au besoin, dans les appartements.

Ce procédé donne des garanties précieuses au point de vue de la sécurité et il assure aux divers circuits une complète indépendance, ce qui limite les extinctions en cas d'interruption dans un conducteur.

**768. — Avant-projet d'éclairage d'une gare, usine ou autre bâtiment important.** — Les règles suivies dans les distributions électriques urbaines trouvent leur application dans les installations particulières comportant leur station génératrice. Selon l'étendue de ces installations, on adoptera une distribution à haute tension

par courants alternatifs, une distribution par courant continu à trois conducteurs et 220 volts ou une distribution à deux conducteurs à 110 volts.

Nous supposerons ce dernier cas, de beaucoup le plus fréquent.

La première étude de l'avant-projet consiste à fixer sur le plan des lieux le nombre, la nature et la position des lampes à installer. On trouvera au § 738 les données nécessaires pour la détermination du nombre des lampes à incandescence.

L'alimentation de ces lampes se fait, dans les grandes installations, par des feeders venant du tableau principal et reliés en des points convenablement choisis d'un réseau souvent réduit à une maille. On choisit les points de raccordement, où la différence de potentiel est maintenue constante d'après les indications de voltmètres reliés à des fils pilotes, de manière à régulariser autant que possible la tension aux lampes.

Au réseau se raccordent des tableaux secondaires d'où partent des circuits de 5 à 6 lampes comme on l'a vu au paragraphe précédent. La forme à donner aux mailles du réseau résulte de la disposition des lieux. Ainsi dans une série de bâtiments formant un rectangle, on adoptera une maille rectangulaire.

On se donne, d'une part, la perte dans les feeders et, d'autre part, la perte dans le réseau et les branchements jusqu'aux lampes. Il est facile d'en déduire la section des conducteurs. Comme on l'a vu au § 766, si $l$ désigne la longueur en mètres de chacun des conducteurs, doublée pour tenir compte du fil de retour, $s$ la section en mm², $v$ la perte en volts

$$v = \frac{li}{60s};$$

on en déduit

$$s = \frac{li}{60v}.$$

Si, dans une série de conducteurs pour lesquels

$$V = \Sigma \frac{li}{60s},$$

la densité $\frac{i}{s} = \delta$ est constante, la perte de charge ne dépend que de la longueur.

Pour simplifier la pose et ne pas trop multiplier les types de câbles employés, on adopte fréquemment des fils de section uniforme pour les circuits de 5 lampes.

Pour déterminer cette section, on peut supposer que les dérivations vers les lampes, au lieu d'être échelonnées le long des conducteurs, sont groupées en un point choisi à distances égales des dérivations extrêmes.

Si, par exemple, on admet $s = 2$ mm², $v = 0{,}5$ V et $i = 2{,}5$ A, on voit que la longueur double moyenne qu'on peut donner à ces circuits est

$$l = \frac{0{,}5 \times 60 \times 2}{2{,}5} = 24 \text{ m.}$$

Si l'on consent à la même perte dans les fils dérivés vers chaque lampe et si la section de ces conducteurs est de 1,5 mm², on a

$$l = \frac{0{,}5 \times 60 \times 1{,}5}{0{,}5} = 90 \text{ m.}$$

Ces conducteurs permettent donc d'alimenter des lampes assez éloignées les unes des autres.

Les lampes à arc sont spécialement employées pour l'éclairage des espaces découverts et des grandes halles ; on se donne l'éclairement moyen à réaliser et, d'après les formules du § 738, on détermine le rayon du cercle qu'un foyer est susceptible d'éclairer. Sur un plan de la surface étudiée, on trace autant de circonférences de ce rayon qu'il en faut pour la remplir. Si des murs blancs bordent la surface à éclairer, ils diffusent la lumière qu'ils reçoivent, ce qui permet de laisser un certain intervalle entre les cercles d'éclairement.

Dans une distribution à 110 volts les lampes à arc sont réunies en série par deux et fréquemment alimentées par des conducteurs spéciaux venant du tableau principal situé dans la chambre des machines. Les lampes qui se suivent ne font pas partie d'un même circuit ; on alterne de manière que si l'un des circuits est interrompu accidentellement, la surface reste suffisamment éclairée.

On calcule les conducteurs de manière à réduire le plus possible les résistances additionnelles à placer au tableau dans chaque circuit de deux lampes. Il ne faut toutefois pas dépasser la densité

de courant limite compatible avec la sécurité, § 474. Le calcul se fait à l'aide de la formule

$$s = \frac{li}{60v}.$$

Pour déterminer le diamètre du fil des résistances additionnelles, on emploie la formule

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho i^2}{k\pi^2}},$$

où $d$ est le diamètre du fil en cm, $\rho$ la résistance spécifique du métal en ohms-cm, $i$ l'intensité du courant en ampères et $k$ le rapport des watts perdus à la surface (en $cm^2$) nécessaire pour les dissiper sans échauffement exagéré du conducteur. $k$ correspond souvent à 5 $cm^2$ par watt, soit $k = 0,2$. Connaissant le diamètre du fil, il est facile d'en déterminer la longueur d'après la chute de tension $v = ir$ admise dans la résistance additionnelle.

Lorsque les foyers à arc doivent être placés à des distances des dynamos supérieures à 300 m, il est avantageux, au point de vue de l'économie des conducteurs, de former des groupes de nombreuses lampes en série, en ayant toujours soin de disposer les lampes voisines sur des circuits distincts pour parer au danger d'une extinction totale.

Les parcours des conducteurs sont figurés soigneusement sur le plan des lieux à éclairer afin de déterminer les longueurs des câbles. On majore celles-ci de 10 à 20 pour 100, suivant les cas, pour tenir compte des obstacles, moulures ou détours non indiqués au plan. La position des lampes et des tableaux secondaires est aussi nettement désignée.

On joint au plan un tableau des conducteurs nécessaires, renseignant, pour chaque conducteur, la longueur aller et retour, la perte en volts consentie, l'intensité du courant, la section, la composition du câble, la densité du courant et le poids. Ces éléments permettent de fixer le prix de la canalisation.

On termine l'avant-projet par le calcul de l'installation génératrice. On détermine le nombre et l'importance des dynamos et éventuellement des accumulateurs en suivant les indications données précédemment.

**769. — Cahier des charges relatif à une installation d'éclairage électrique.** — Afin de montrer l'application des règles de sécurité adoptées dans les installations électriques, nous donnerons un modèle de cahier des charges relatif à l'éclairage d'un théâtre, c'est à dire au cas où les précautions à employer doivent être les plus minutieuses, tant au point de vue de la sécurité contre l'incendie qu'au point de vue des dangers d'extinction de la lumière.

*Objet de l'entreprise.* L'entreprise comprend la fourniture et l'installation de tous les appareils mécaniques et électriques nécessaires à l'éclairage du théâtre de . . . . Ces appareils, dont le détail fait l'objet des paragraphes suivants, comportent principalement :

*A*. Deux chaudières multitubulaires de 80 $m^2$ de surface de chauffe, avec cheval alimentaire, cheminée et tous les autres accessoires.

*B*. Deux machines à vapeur, identiques, à pièces interchangeables, capables de fournir chacune 50 chevaux-vapeur indiqués.

*C*. Deux machines dynamo-électriques, identiques, à pièces interchangeables, chacune de 25 kilowatts ; chaque dynamo sera attaquée par un des moteurs, directement ou par l'intermédiaire d'une seule courroie. La vitesse angulaire des moteurs à vapeur et des dynamos devra être aussi réduite que possible.

*D*. Une turbine, avec régulateur de vitesse automatique, capable de développer 8 chevaux utiles, sous la pression de 5 atmosphères fournie par la distribution d'eau de la ville. Cette turbine conduira le ventilateur, à fournir par l'entrepreneur du chauffage du théâtre, ainsi que la dynamo ci-après, destinée à l'éclairage des répétitions.

*E*. Une machine dynamo-électrique capable de débiter 2 kilowatts.

*F*. 862 lampes à incandescence dont le détail est joint au présent cahier des charges.

*G*. 8 lampes à arc, la canalisation et tous les accessoires nécessaires au fonctionnement de l'installation.

*Chaudières.* Les deux chaudières seront d'un type tubulaire ou multitubulaire, en vue de permettre une vaporisation rapide. Elles auront chacune 80 $m^2$ de surface de chauffe (surface en contact avec les gaz) et seront timbrées à 8 atmosphères. Elles satisferont à

toutes les prescriptions des règlements belges sur la matière. Les corps cylindriques des chaudières recevront une garniture destinée à réduire, autant que possible, les pertes de chaleur.

Les générateurs seront réunis par l'intermédiaire de clapets de retenue automatiques à un collecteur de vapeur, sur lequel seront branchés les raccordements aux machines à vapeur et à la chaufferie. Ils seront pourvus de tuyaux de vidange d'eau raccordés à l'égout et de tuyaux de vidange de vapeur reliés à la cheminée.

L'entrepreneur fournira un bac d'alimentation d'une contenance de 5 $m^3$ en tôle, avec indicateur de niveau d'eau et robinet de vidange. Ce bac recevra les eaux de décharge de la chaufferie, ainsi qu'une partie de la décharge de la turbine. Une pompe à vapeur alimentaire et un injecteur de réserve refouleront l'eau du bac soit dans les deux générateurs, soit dans chacun de ceux-ci isolément.

Une prise d'eau spéciale permettra de remplir les chaudières avec de l'eau alimentaire, sans recourir aux appareils de refoulement.

La cheminée, de section circulaire, aura au moins 30 mètres de hauteur au-dessus du niveau des carneaux.

Les conduites de vapeur seront en fer étiré couvert de calorifuge de première qualité.

Près des moteurs seront installés des appareils destinés à retenir l'eau de primage, avec purgeurs automatiques raccordés à l'égout.

La consommation de combustible tout venant, garantie par cheval-heure indiqué à la machine à vapeur, sera spécifiée par les soumissionnaires.

*Moteurs à vapeur.* Les deux machines à vapeur seront établies sur des fondations faisant corps avec celles des dynamos et isolées du sol par des matières amortissantes, de manière à éviter la propagation des vibrations.

Les moteurs seront à détente variable par le régulateur. Ils développeront chacun 50 chevaux indiqués à la pression de 6 atmosphères effectives et au degré de détente le plus économique. Les moteurs devront pouvoir fournir 25 pour cent de travail supplémentaire en cas de surcharge des dynamos, sans qu'on touche à la valve d'admission. Les courroies seront éventuellement calculées en prévision de cette surcharge.

Le graissage des organes de distribution et du cylindre s'opérera par la vapeur.

Les machines fonctionneront sans choc et sans bruit Elles seront pourvues de valves permettant d'envoyer la vapeur de décharge indifféremment dans les appareils de chauffage ou à l'air libre.

La vapeur passera au sortir des machines dans un récipient d'une capacité suffisante pour étouffer le bruit de la décharge. Ce récipient sera muni d'un purgeur automatique raccordé à l'égout.

Les machines seront finies et ajustées avec un soin égal à celui apporté par les meilleurs constructeurs.

Au cas où les machines attaquent directement les dynamos, on interposera des manchons élastiques analogues à ceux de M. Raffard.

*Dynamos de 25 kilowatts.* Les 2 grandes dynamos, excitées en dérivation, devront fournir chacune une puissance de 25 kilowatts à la tension de 110 volts. Elles seront munies de régulateurs de champ magnétique, suffisants pour qu'on puisse faire varier la tension de 10 pour cent, au-dessus ou au-dessous de la tension normale.

Les dynamos devront fournir un courant dépassant de 25 pour cent le courant normal sans que la température de l'induit dépasse de plus de 60° la température ambiante, après 6 heures de pleine marche. Cette limite est choisie dans le dessein de permettre, en cas d'avarie à l'un des groupes de machines, d'alimenter les lampes strictement nécessaires à l'éclairage du théâtre à l'aide du second groupe.

Chaque prise de courant au collecteur sera pourvue d'au moins deux balais. Il ne pourra y avoir d'étincelles visibles au collecteur, pendant la marche normale des machines. Il sera fourni, avec chaque dynamo, un collecteur de rechange et deux jeux de balais.

Les dynamos seront éventuellement pourvues de coulisseaux pour régler la tension des courroies en marche.

On fournira des bâches imperméables pour couvrir les machines et les dynamos pendant la période de clôture du théâtre.

Le rendement combiné des moteurs et des dynamos sera d'au moins 75 pour cent, c'est à dire que chaque dynamo devra fournir au moins 37 $^1/_2$ chevaux électriques utiles, pour 50 chevaux indiqués à la machine à vapeur correspondante.

Les valeurs garanties pour le rendement des machines et la consommation des générateurs devront être satisfaites, si même la puissance fournie s'écarte de 25 pour cent en plus ou en moins de la puissance nominale.

*Turbine.* La turbine devra fournir 8 chevaux utiles à la pression d'eau de 5 atmosphères. Un régulateur automatique maintiendra la vitesse de régime à 6 pour cent près, quelles que soient les variations de la charge.

La consommation de la turbine n'excédera pas 60 $m^3$ d'eau à l'heure, pour une puissance utilisable de 8 chevaux.

La turbine sera munie d'une poulie destinée à la commande du ventilateur.

*Dynamo de 2 kilowatts.* La dynamo de 2 kilowatts sera conduite directement par la turbine, par l'intermédiaire d'un manchon du genre Raffard. Les deux appareils reposeront sur une fondation isolée du sol par des matières amortissantes.

La dynamo sera excitée en dérivation et pourvue d'un régulateur de champ magnétique, suffisant pour faire varier la tension de 10 pour cent au-dessus et au-dessous de la tension normale de 110 volts.

*Tableau de la salle des machines.* Toutes les connexions seront facilement accessibles à l'arrière du tableau.

Le tableau, en marbre ou en ardoise, comprendra deux barres principales pouvant être reliées, par l'intermédiaire de 3 ampèremètres appropriés, avec les trois dynamos, et auxquelles se raccorderont les dérivations vers les lampes. Les appareils de mesure seront disposés de manière à ne pas être influencés par les courants qui parcourent les conducteurs du tableau.

Les plaques de sûreté et les interrupteurs placés à l'origine de ces dérivations seront à double pôle.

A chaque dynamo sera affecté un voltmètre. Un indicateur de terre et un voltmètre avertisseur à sonnerie seront adjoints à l'installation.

Un dispositif spécial rendra impossible le raccordement d'une dynamo au réseau, avant qu'elle ait été excitée séparément.

Le raccordement des lampes au tableau devra être étudié de manière qu'en cas d'accident à l'un des groupes de machines, le

mécanicien puisse éteindre, par la manœuvre d'un commutateur unique, toutes les lampes qui ne sont pas rigoureusement indispensables. Les éclairages de la salle et de la scène devront être conservés intégralement par cette manœuvre, mais l'éclairage de tous les autres locaux devra être réduit au strict nécessaire.

Un circuit spécial partant du tableau permettra d'allumer deux lampes à la rampe et cinq lampes à l'orchestre pour les répétitions. C'est également au tableau que se trouveront les interrupteurs des lampes à arc autres que celles de la scène. Chaque groupe de deux lampes sera pourvu d'un indicateur et d'une résistance variable.

*Jeu d'orgue.* Au jeu d'orgue aboutissent toutes les dérivations de la salle et de la scène nécessaires pour produire les effets de lumière. Ces dérivations seront raccordées par des interrupteurs bipolaires et des coupe-circuits bipolaires. Les branchements seront assez nombreux pour qu'il soit possible de concentrer, au jeu d'orgue, tous les coupe-circuits fusibles de la scène, tout en satisfaisant aux conditions relatives à ces appareils.

Les lampes de la salle, les lampes de chaque portant, de chaque herse, de la rampe, ainsi que les lampes des coulisses et des dessus pouvant éclairer la scène, devront pouvoir être graduées par des rhéostats disposés au jeu d'orgue et pourvus d'un nombre de touches suffisant pour régler la tension par degrés correspondant au plus à $^1/_2$ volt de 110 à 100 volts, à 1 volt de 100 à 90 volts, et de 2 volts de 90 volts jusqu'à l'extinction des foyers lumineux.

Les manivelles des rhéostats devront pouvoir être embrayées en nombre quelconque pour produire les effets d'ensemble par la manœuvre d'une manivelle unique.

Les rhéostats seront enfermés dans une caisse démontable en tôle perforée. Ils seront distants d'au moins 30 cm de toute matière combustible et seront facilement accessibles, dans toutes leurs parties, pour les réparations. Les conducteurs qui les composent seront calculés de manière que leur température n'excède pas de 40° C la température ambiante, lorsqu'ils sont traversés par le courant maximum.

Au jeu d'orgue figurera un voltmètre indiquant la tension des conducteurs d'alimentation et pouvant être relié à l'un quelconque des groupes de lampes.

Un système d'appel permettra de communiquer avec la salle des machines.

Tous les appareils du jeu d'orgue doivent être disposés de manière à pouvoir être manœuvrés aisément par un seul homme, celui-ci étant placé de telle façon qu'il voie les effets de scène qu'il produit.

*Conducteurs.* Les conducteurs seront en cuivre étamé, recouverts d'une couche de caoutchouc pur, d'une couche de caoutchouc vulcanisé, d'un ruban de toile silicatée et d'une tresse de chanvre de manille également silicatée.

Les fils des lampes mobiles de la scène seront en outre cousus dans une gaîne de cuir.

Dans les parties non accessibles au public, les câbles non à portée de la main seront tendus entre des mâchoires en porcelaine. Ces isolateurs seront écartés de 50 cm suivant une même ligne, et les câbles de polarités différentes seront distants d'au moins 15 cm.

Dans les autres parties, les câbles seront placés dans des lattes à rainures et sous moulures. Les fils de polarités différentes seront séparés par un intervalle d'au moins 15 mm.

Pour les fils fixes, éventuellement placés dans des conduites isolantes, imperméables et pratiquement incombustibles, on se contentera d'une gaîne isolante réduite.

Les densités maxima de courant tolérées dans les fils sont les suivantes :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 4 | ampères par $mm^2$ | jusque | 5 $mm^2$ | de section |
| 3 | » | » | 15 » | » |
| 2 | » | » | 100 » | » |
| 1 | » | au delà de | 100 » | » |

Dans le calcul des conducteurs, les lampes à incandescence seront comptées à raison de 4 watts par bougie.

Il ne sera pas fait usage de fils d'une section inférieure à 1 $^1/_2$ $mm^2$. Les conducteurs d'une section supérieure à 3 $mm^2$ seront formés d'un toron de plusieurs fils.

Les circuits des lampes à arc devront être calculés pour le double du courant normal.

Les joints devront avoir une solidité, une imperméabilité et un

isolement égaux à ceux des conducteurs. Ils seront soudés à la résine.

Les prises de courant des lampes mobiles de la scène, c'est à dire des herses, des portants et des projecteurs, seront enfermées dans des trappes et disposées de manière que les étincelles de rupture ne puissent se produire au contact de matières combustibles.

Les fils traversant les murs et les planchers seront protégés par des tuyaux en matière isolante et incombustible. Ces tubes seront protégés, à la partie supérieure des planchers, par des tuyaux en fer dépassant le sol de 10 cm.

Aux croisements des conducteurs avec d'autres conducteurs de polarité différente, ou avec des tuyaux métalliques, les fils seront protégés par une matière solide et incombustible, ayant au moins 5 mm d'épaisseur.

Aux croisements des fils avec les conduites de vapeur, on laissera un écartement d'au moins 15 cm.

*Coupe-circuits fusibles.* Des coupe-circuits doubles seront placés à l'origine de tous les branchements correspondant à plus de 5 ampères.

Les coupe-circuits doivent posséder des supports et des couvercles incombustibles.

Ils doivent être groupés sur des tableaux secondaires, placés à portée de la main dans les dégagements. Ces tableaux seront fermés par des couvercles à clefs d'un type unique.

Les coupe-circuits porteront un numéro d'ordre, répété de distance en distance le long des branchements protégés. Ils indiqueront, en outre, l'intensité du courant normal.

Il ne sera fait usage de fils fusibles en plomb qu'à la condition de les souder aux pièces de support. L'étain et les alliages inoxydables seront préférés. Les plaques fusibles pour plus de 15 ampères seront formées de faisceaux de fils écartés.

*Commutateurs, interrupteurs.* Tous les commutateurs et interrupteurs pour courants supérieurs à 10 ampères seront bipolaires. Les surfaces de contact seront calculées à raison de 1/5 d'ampère par mm².

Les interrupteurs auront des socles et des couvercles incombustibles. Ils seront à rupture rapide. Les distances entre les

pièces métalliques devront empêcher la formation d'arcs permanents. Des interrupteurs seront placés dans le foyer, les buvettes et le vestibule d'entrée, afin de permettre d'éteindre la moitié des lampes pendant la pièce.

*Lampes à incandescence et à arc voltaïque.* Les lampes à incandescence mobiles sont interdites, sauf sur la scène où les raccordements se feront avec les précautions décrites plus haut.

Les lampes seront fixées à des supports rigides, appliques, lustres ou pendants.

La fourniture des lampes à incandescence, y compris une réserve de 25 pour cent, fait partie de l'entreprise. L'entrepreneur fournira 10 pour cent de globes de lampes et 25 pour cent de bouchons et plaques fusibles de réserve.

L'entrepreneur devra également fournir et installer les portants, la rampe et les herses. Les coquilles constituant ces parties devront être grillées de manière à prévenir le contact des lampes avec les objets extérieurs.

Il y aura à la rampe des lampes blanches, des lampes vertes et des lampes rouges pour produire les effets de scène.

Les lampes à arc, destinées à la scène, seront enfermées dans des projecteurs fermés et munis d'un joint permettant de diriger rapidement le faisceau lumineux dans les diverses directions. Des glaces claires, rouges ou vertes pourront être interposées sur le parcours du faisceau. Les résistances additionnelles de ces lampes seront au jeu d'orgue. Les lampes à arc suspendues seront pourvues de globes opalins à treillis et munies de cendriers. Les lanternes, appareils et poteaux des lampes à arc font partie de l'entreprise.

*Isolement de l'installation et perte de charge.* La résistance d'isolement de l'ensemble du réseau électrique, comprenant les machines, les conducteurs, les lampes et tous les appareils traversés par le courant, doit être d'au moins 5000 ohms.

La perte de charge entre les dynamos et les lampes à incandescence ne dépassera pas 3 volts.

*Conditions générales.* Art. I. L'entreprise comprend tous les accessoires des machines et de la canalisation non mentionnés dans le présent cahier des charges, mais nécessaires au fonctionnement de l'installation, y compris les fondations des machines et la

maçonnerie des chaudières. Tous les appareils seront posés et prêts à fonctionner.

ART. II. L'entreprise des fournitures et des travaux constitue un forfait absolu.

ART. III. Les fournitures et les travaux seront garantis pendant deux ans par l'entrepreneur, à l'exception des matières de consommation, à savoir : les lampes à incandescence, les charbons des lampes à arc et les balais des machines que la Ville se réserve le droit d'acheter où bon lui semblera.

Toutes les parties défectueuses de l'entreprise seront remplacées aux frais de l'entrepreneur, pendant le délai de garantie et endéans les quinze jours qui suivront l'avis, faute de quoi le remplacement aura lieu d'office, aux frais de l'entrepreneur.

L'entrepreneur devra former les agents préposés à la conduite de l'installation et fera surveiller celle-ci de manière à pouvoir assumer l'entière responsabilité de l'entreprise et sans qu'il en résulte de frais pour la Ville.

ART. IV. L'entrepreneur accompagnera sa soumission :

*A*. D'un devis détaillé.

*B*. Des plans détaillés et cotés des appareils concourant à la production de l'énergie électrique, y compris leurs fondations.

*C*. D'une copie des plans des lieux à éclairer, avec l'indication des tableaux secondaires, des interrupteurs, des lampes, ainsi que des parcours, des sections et des courants de régime des conducteurs. Les Nos d'ordre des conducteurs et des coupe-circuits fusibles seront également inscrits sur ces plans.

*D*. Des échantillons des câbles, interrupteurs, coupe-circuits, isolateurs et de tous les accessoires employés dans l'installation.

*E*. Des dessins des appliques, des supports et de l'appareillage des lampes à fournir par l'entrepreneur.

ART. V. L'entrepreneur devra indiquer le système, la provenance et le nom du constructeur de tout appareil dont il ne fournit pas d'échantillon.

ART. VI. A l'exception du bâtiment destiné aux chaudières et aux machines, tous les travaux exigés par l'installation électrique seront exécutés par l'entrepreneur ou à ses frais. Il devra réparer toutes les dégradations entraînées par l'installation.

Art. VII. Si la Ville juge nécessaire de retrancher ou d'ajouter des fournitures ou des travaux, l'entrepreneur devra se conformer aux ordres qui lui seront donnés. Il en sera tenu compte dans le premier cas au prix de son devis; dans le second cas un prix sera fixé d'avance et par écrit.

Art. VIII. Les soumissions, échantillons et plans seront envoyés à M. l'Ingénieur-Directeur. La date limite du dépôt est fixée au . . . .

Art. IX. Les bâtiments, y compris les caves des machines et des chaudières, seront mis à la disposition de l'entrepreneur pour le . . . . , au plus tard.

La Ville remettra à l'entrepreneur, dans un délai d'un mois après l'approbation des soumissions, les appareils de lustrerie nécessaires à l'installation des lampes dans la salle et au foyer, tous les autres supports de lampes à arc ou à incandescence devant être fournis par l'entrepreneur.

Art. X. Les travaux devront être complètement terminés cinq mois après la notification de l'approbation de la soumission, sous peine d'une retenue de 100 fr. par jour de retard, à titre de dommages et intérêts.

Art. XI. La Ville se réserve une liberté complète dans le choix de l'entrepreneur.

Art. XII. Les soumissionnaires verseront dans la caisse communale de . . . . un cautionnement de 6000 fr. dont la reconnaissance sera jointe à leurs soumissions.

En cas de non acceptation des soumissions, le cautionnement sera remboursé sans intérêts dans les trois mois qui suivront le dépôt.

Art. XIII. La réception provisoire de l'installation aura lieu dans le courant des trois mois qui suivront l'achèvement de celle-ci. Le paiement du montant de l'entreprise, diminué du cautionnement, aura lieu immédiatement après la réception provisoire. Le cautionnement sera remboursé sans intérêts à l'expiration du délai de garantie, époque à laquelle aura lieu la réception définitive.

Art. XIV. En cas de contestation, chacune des parties nommera un arbitre; si ceux-ci sont en désaccord, ils choisiront un troisième arbitre pour les départager. A défaut d'entente, ce choix

sera laissé au Président du Tribunal de commerce. La décision des arbitres est sans appel juridique.

Art. XV. Les copies des plans nécessaires à l'étude de l'installation seront délivrées aux intéressés, moyennant la somme de . . . .

Art. XVI. Les soumissions seront rédigées en langue française. Les soumissionnaires étrangers éliront domicile en Belgique.

*Modèle de soumission* (à dresser sur timbre).

*Je soussigné*, (nom, prénoms et qualités) *domicilié à*. . . . . . , *rue* . . . . , *N°* . . , *m'engage par la présente, sur mes biens, meubles et immeubles, à effectuer, aux clauses et conditions du cahier des charges, N°* . . , *du* . . . . . *(éventuellement sous réserve des modifications suivantes* . . . . . . . . . . . . . *) et moyennant la somme de* . . . . . *détaillée dans mon devis, les travaux et les fournitures des appareils et objets prévus dans le susdit cahier des charges.*

# ÉLECTROMÉTALLURGIE.

770. — **Lois régissant l'électrométallurgie.** (¹) — Nous désignerons sous le nom d'*électrométallurgie* l'ensemble des procédés électriques propres à la réduction et au travail des métaux.

Ces procédés, restreints pendant longtemps à la galvanoplastie, se sont développés à partir du jour où les dynamos ont fourni l'énergie électrique à bon compte. Les pays montagneux où les chutes d'eau abondent sont, à cet égard, dans une situation favorisée, et le jour viendra où ils pourront se passer du charbon et traiter par l'électricité une grande partie des richesses minérales qu'ils contiennent.

Les traitements électrométallurgiques se divisent en deux classes : dans la première, qui forme l'objet de l'électrométallurgie par voie humide, les métaux sont traités au sein de dissolutions

---

(¹) H. Ponthière, *L'Électrochimie et l'électrométallurgie*. Louvain, Peeters-Ruelens, 1886.

A. Minet, *Application de l'électricité à la chimie. La Lumière Électrique*, 1889.

Gore, *The electrolytic separation of metals*. Londres, 1890.

H. Fontaine, *Traité d'Électrolyse*. Paris, 1892.

salines ; la seconde, l'électrométallurgie par voie sèche, utilise les procédés électriques de production de la chaleur avec ou sans le concours des actions électrolytiques.

Les décompositions électrolytiques, qui forment la base de la plupart des modes de traitement que nous allons étudier, sont régies en premier lieu par les *lois de Faraday* et *de Becquerel*, qui établissent la proportionnalité entre les quantités de matière intéressées dans les réactions et l'intensité du courant, § 121. Ces lois peuvent se résumer dans l'énoncé suivant.

I. Les poids d'électrolytes décomposés par un coulomb sont proportionnels à leurs poids moléculaires, pourvu que l'élément électronégatif entre dans la formule du composé avec un seul équivalent.

Au lieu d'employer les formules chimiques, telles que $Ca\ Cl^2$, $Fe^2\ Cl^6$, on adoptera les *formules électrolytiques* $Ca\ \frac{1}{2}\ Cl$, $Fe\ \frac{1}{3}\ Cl$ dans les calculs. Dans ces conditions, si l'on remplace chaque élément par son équivalent chimique exprimant des milligrammes, et si l'on tient compte des coefficients fractionnaires, la somme trouvée pour chaque électrolyte représente le poids décomposé par 96,3 coulombs. Si l'on se sert d'une table de poids atomiques on devra, pour les corps d'atomicités paires, ne prendre que la moitié des nombres inscrits.

II. La *loi de Joule* indique qu'il se forme dans le bain, par seconde, une quantité de chaleur égale à sa résistance multipliée par le carré de l'intensité du courant.

III. La *loi de Thomson*, déterminant la force électromotrice minima nécessaire à l'électrolyse, est ainsi conçue :

La force électromotrice minima est proportionnelle à la chaleur de formation du composé, à la condition de rapporter, comme ci-dessus, l'élément électronégatif à un seul équivalent. On a vu, § 289, que l'application de cette loi peut être soumise à certaines restrictions.

Si l'on désigne par $c$, en calories (gr-d), la chaleur de formation de la molécule électrolytique estimée en milligrammes, la force électromotrice s'exprime, en volts, par

$$e = 0{,}043\ c.$$

IV. La *loi de Sprague*, qui complète la précédente, établit que, si plusieurs électrolytes sont mélangés, les premiers décomposés sont ceux dont la chaleur de formation est la plus faible.

Ainsi, la décomposition d'une solution de chlorure de chrome, opérée entre des électrodes insolubles en faisant croître progressivement la différence de potentiel aux électrodes, fournit à la cathode d'abord de l'hydrogène, puis de l'oxyde de chrome, puis de l'oxydule et finalement du chrome. Une opinion souvent émise est que le sel est décomposé en métal et en radical acide, et que le métal libéré donne lieu à des réactions secondaires au contact du liquide et des gaz qui entourent la cathode. Mais, en réalité, les divers produits successifs correspondent à des forces contre-électromotrices croissantes. Ce n'est que quand la différence de potentiel aux électrodes a atteint une certaine valeur déterminée que le chrome apparaît à l'état métallique.

Les réactions secondaires se produisent toutefois quand plusieurs corps sont électrolysés simultanément. Ainsi, la décomposition du sulfate de zinc en solution exige une force électromotrice supérieure à la tension de 1,5 volt, à laquelle l'eau s'électrolyse. Les deux décompositions sont, par suite, simultanées; mais le corps le plus réductible, le sel métallique, se décompose en plus forte proportion. L'électrolyse de l'eau donne non seulement lieu à une dépense considérable en pure perte, mais l'hydrogène naissant décompose le sel métallique et fait que le métal déposé à la cathode est noir et pulvérulent.

La densité du courant, c'est à dire le rapport de son intensité à la surface de la cathode, est souvent prise en considération pour définir les conditions de fonctionnement des traitements électrolytiques. Cet élément résulte de la différence de tension aux électrodes, de la force contre-électromotrice du bain, ainsi que des dimensions de celui-ci. La notion de densité de courant permet, par suite, de condenser en un seul renseignement numérique un ensemble de caractères différents.

## ÉLECTROMÉTALLURGIE PAR VOIE HUMIDE.

771. — **Divisions.** — Les procédés de l'électrométallurgie par voie humide se classent, d'après le résultat qu'on cherche à atteindre, en quatre catégories :

1° La galvanoplastie, dont l'objet est la reproduction de modèles.

2° La formation de dépôts métalliques destinés à durcir ou à rendre inaltérables des objets de métal ou d'autre matière.

3° Le raffinage des métaux.

4° Le traitement des minerais.

A un autre point de vue, les procédés électrolytiques se caractérisent par l'emploi d'anodes solubles ou d'anodes insolubles. On a un exemple du premier cas dans le transport qui s'opère entre des électrodes de cuivre plongées dans une solution cuivrique traversée par le courant; l'électrolyse d'une telle solution à l'aide d'une anode en platine ou en charbon fournit une application du second cas.

Le caractère distinctif de ces deux modes de traitement se trouve dans l'énergie dépensée: le premier, permettant d'utiliser l'énergie due à la dissolution de l'anode dans l'électrolyte, exige beaucoup moins de dépense de travail que le second.

Considérons, par exemple, l'électrolyse du sulfate cuivrique. La décomposition du sel absorbe 28,4 calories (gr-d) par équivalent chimique (mmg), ce qui représente une énergie de 1,07 kilowatt-heure par kilogramme de métal réduit. Lorsque l'anode est insoluble, il faut dépenser, pour la décomposition de l'électrolyte, ce travail augmenté de celui que représente l'échauffement du bain par l'effet Joule.

Si, au contraire, on fait usage d'une anode en cuivre pur, la dissolution de ce métal dans l'acide libéré par l'électrolyse restitue intégralement 28,4 calories par équivalent, en sorte que la seule dépense nécessaire au dépôt du cuivre sur la cathode correspond à l'effet Joule. Dans le cas où l'on emploierait le sulfure cuivrique comme anode, le métal se dissoudrait dans l'acide sulfurique libéré, avec dépôt de soufre, et l'ensemble des réactions chimiques se bornerait à la réduction du sulfure, qui absorbe 5,1 calories par équivalent.

Les procédés par voie humide se prêtent à une surveillance attentive de la marche des opérations et à une graduation du courant qu'on peut règler de manière à obtenir des dépôts métalliques homogènes. Lorsque le bain renferme un mélange de plusieurs sels, il est d'autant plus facile d'obtenir un produit pur à la cathode

que la proportion du sel qu'on cherche à réduire est plus grande et que sa force électromotrice de décomposition est moindre que celles des autres sels du bain. L'inverse est également vrai, ce qui donne la possibilité de déposer à l'état de mélanges et même d'alliages des métaux dissous en mêmes proportions et ayant des chaleurs de combinaison peu différentes.

772. — **Effets de la diffusibilité des bains. Densité de courant à adopter.** — L'électrolyse d'une solution métallique amène une modification dans la composition du bain au voisinage des électrodes. C'est la diffusion qui unifie la solution, laquelle tend à s'appauvrir au voisinage de la cathode et à s'enrichir au contact d'une anode soluble. C'est aussi la diffusion qui tend à s'opposer à l'accumulation au fond du bain du liquide enrichi, le liquide appauvri cherchant à gagner la surface. Le résultat de cette séparation serait une inégale distribution du courant et un dépôt irrégulier. En outre, lorsqu'une électrode métallique est ainsi en contact avec deux couches liquides de concentrations différentes, il tend à se produire un couple local en vertu duquel la partie de la lame baignée par le liquide appauvri est corrodée, tandis que la partie en contact avec la liqueur plus concentrée se couvre d'un dépôt de métal réduit.

L'appauvrissement du bain au voisinage de la cathode tend à favoriser la décomposition des impuretés de l'électrolyte et par suite à altérer le métal déposé. Parfois la concentration du bain à l'anode amène dans les solutions riches un dépôt de sel à l'état cristallin sur cette électrode. Pour ces raisons, on choisit les solutions ayant le pouvoir diffusif le plus élevé et, au besoin, on favorise la diffusion par une élévation de température ou par une circulation établie au sein du liquide. L'élévation de température diminue, en outre, la résistance du bain.

Certaines solutions salines, telles que celle de sulfate de cuivre, demandent à être acidulées pour fournir des dépôts réguliers; mais l'acide libre attaque alors dans une proportion plus ou moins forte le dépôt de la cathode.

La densité du courant a une influence capitale sur l'état du dépôt à la cathode. Si elle est faible, le métal est réduit à l'état cristallin.

Pour une densité moyenne, le dépôt a la texture du métal fondu.

Lorsque la densité est forte, la réduction donne un produit noir et pulvérulent. Aux arêtes des électrodes, où la densité est souvent plus forte, le métal peut affecter la forme de nodosités faiblement adhérentes.

Une densité excessive est susceptible de soustraire un métal très oxydable à l'attaque du bain. C'est le cas lorsqu'on électrolyse un sel de potassium avec une petite cathode en mercure. Le métal alcalin est mis à l'abri de l'action chimique de l'électrolyte par le courant et s'amalgame avec le mercure.

Voici, d'après M. Gore, les valeurs de la densité de courant et de la différence de potentiel à appliquer à l'électrolyse de quelques sels.

| NATURE DU SEL A ÉLECTROLYSER. | AMPÈRES PAR DCM² DE CATHODE. | DIFFÉRENCE DE POTENTIEL AUX ÉLECTRODES. |
|---|---|---|
| Sulfate de cuivre . . . . | 1,2 à 1,7 | 0,7 |
| Cyanure de cuivre . . . | 0,6 | 3,0 |
| Cyanure d'argent . . . . | 0,5 | 1,0 |
| Cyanure d'or . . . . . | 0,1 | 4,0 |
| Sulfate double de nickel et d'ammonium. . . . . | 0,3 à 0,6 | 2 à 3 |

M. Minet admet, comme règle générale, que la densité de courant doit être proportionnelle au rapport de l'équivalent électrochimique à la densité de l'élément électropositif déposé. Le meilleur dépôt de cuivre correspondant à une surface de cathode d'environ 1 dm² par ampère, la surface de cathode sera, par unité de courant, de 0,63 dm² pour le nickel, de 0,67 dm² pour le fer, de 1,27 dm² pour le zinc, de 1,3 dm² pour le platine, de 1,44 dm² pour l'or et de 2,9 dm² pour l'argent. Cette règle peut fournir une première indication, mais elle a l'inconvénient de faire abstraction de la diffusibilité du sel électrolysé.

## GALVANOPLASTIE.

773. — **But.** — La galvanoplastie, découverte par Jacobi, a pour objet la reproduction de modèles par un dépôt métallique effectué

dans un moule pris sur l'objet à reproduire. Le moule forme la cathode dans une dissolution du métal à déposer; l'anode est le plus souvent une plaque de ce même métal. Dans ce cas, l'opération se réduit à un transport d'une électrode à l'autre et la dépense d'énergie électrique est minime.

La galvanoplastie rend de grands services à l'art industriel en permettant d'obtenir des reproductions en cuivre d'œuvres d'art. L'opération se faisant à froid, les contours des objets sont rendus avec beaucoup plus de fidélité que dans les procédés de moulage par fusion.

Au nombre des applications les plus répandues, il faut citer l'*électrotypie* qui permet d'obtenir des planches de cuivre d'après les gravures sur bois. Ce procédé, à l'aide duquel une planche gravée peut se tirer à un nombre d'exemplaires considérable, a beaucoup diminué le prix des ouvrages illustrés ayant un grand tirage.

774. — **Moules.** — Les moules sont parfois formés au moyen d'alliages Darcet, dans lesquels l'empreinte de l'objet à mouler se fait à chaud (50 à 100°), ou bien de matières plastiques, telles que le plâtre, la cire, la stéarine, la gélatine ; mais le plus souvent on fait usage de gutta-percha ramollie dans l'eau chaude et appliquée par compression sur le modèle. On peut aussi fondre la matière et la couler après y avoir introduit une substance qui abaisse son point de fusion.

A part les alliages métalliques, les substances que nous venons d'énumérer sont isolantes. On les rend conductrices en les recouvrant de plombagine à la brosse.

Lorsque les pièces présentent des détails très délicats, on provoque un précipité conducteur de sulfure d'argent à la surface du moule, en plaçant ce dernier dans une solution de nitrate d'argent traversée par un courant d'hydrogène sulfuré.

Pour reproduire les objets en ronde bosse, tels que statues, bas-reliefs, etc., on forme le moule en plusieurs parties qu'on assemble entr'elles.

775. — **Conduite des opérations.** — Le moule préparé est placé dans le bain électrolytique, que nous supposerons formé d'une

solution de sulfate de cuivre, en vue d'un dépôt de cuivre. Diverses conditions sont à remplir pour obtenir un bon dépôt solide, d'épaisseur uniforme et moulant exactement tous les détails.

La solution, acidulée au dixième d'acide sulfurique, est chargée de sulfate de cuivre à saturation. On y ajoute souvent de la gélatine en très petite quantité, afin d'accroître la dureté et la ténacité du dépôt, qui atteint une densité de 8,9, supérieure à celle du cuivre fondu.

Le moule et l'anode formée de cuivre ou d'un métal insoluble doivent être convenablement disposés relativement l'un à l'autre. Lorsque les écartements présentent des différences trop grandes, les parties de la surface à métalliser les plus rapprochées de l'anode se recouvrent d'un dépôt abondant, d'aspect grenu, tandis que les parties les plus éloignées ne présentent qu'une mince couche de métal. On empêche cet effet de se produire en plaçant les anodes à une distance suffisamment grande des saillies du moule et en changeant de temps à autre la position des pièces à recouvrir.

Pour la reproduction des objets en ronde bosse, des statues, par exemple, l'anode est constituée par un squelette métallique épousant aussi bien que possible la forme intérieure du moule, sans cependant venir en contact avec lui. On ne peut, dans ces conditions, faire usage d'anodes solubles qu'il serait impossible de renouveler. Les carcasses primitivement employées par Lenoir étaient confectionnées au moyen de fils de platine. Elles donnaient lieu à une dépense notable, à cause du capital considérable immobilisé pendant l'opération qui dure des semaines, et parce qu'il n'est pas toujours possible de retirer toutes les parties de la carcasse hors des pièces moulées. Planté a eu l'idée de construire les squelettes en feuilles de plomb et c'est à cette occasion qu'il a constaté la force électromotrice de polarisation considérable causée par l'anode, ce qui a conduit à la découverte de l'accumulateur.

Le squelette étant fixé à l'intérieur du moule, celui-ci est placé dans le bain après avoir été percé de quelques trous, afin de permettre la circulation du liquide. Celle-ci peut être favorisée par l'agitation, de manière à renouveler plus rapidement la solution au contact des électrodes, au fur et à mesure de l'appauvrissement. Des cristaux de sulfate de cuivre sont suspendus dans le bain, dans des récipients percés de trous.

On a fait remarquer précédemment l'influence de la densité du courant sur la nature des dépôts. Dans les opérations de la galvanoplastie, il convient d'employer au début de l'opération une densité très faible, 0,3 ampère par décimètre carré de surface de cathode, afin que le dépôt reproduise fidèlement les détails du moule. Lorsque cette première couche est formée, il n'y a aucun inconvénient à faire croître progressivement le courant de manière à diminuer la durée de l'opération. Quand le dépôt a acquis une épaisseur suffisante, on le retire du bain. Pour consolider la coquille galvanique, on coule un métal très fusible, tel que du laiton, à l'intérieur. Afin d'améliorer l'aspect de la surface extérieure, on dépose sur celle-ci une pellicule électrolytique d'étain. Par l'action d'un feu de moufle sur l'objet on obtient alors une couche superficielle de bronze.

Dans la confection des clichés électrotypiques et des objets analogues, le dépôt peut être de peu d'épaisseur. On le consolide en coulant sur la face postérieure une doublure de métal plus fusible que le cuivre, tel que l'alliage des caractères d'imprimerie.

776. — **Appareils.** — Jacobi a découvert la galvanoplastie en remarquant que le dépôt de cuivre dont se couvre la cathode de la pile Daniell moule exactement cette électrode. Il en résulte que, pendant longtemps, on a employé, pour cette opération, de grandes piles au sulfate de cuivre dont les moules à garnir formaient le pôle positif. Ces moules baignaient dans une solution de sulfate de cuivre entretenue à saturation par des cristaux de ce sel. Au milieu de la solution, on plaçait des vases poreux contenant de l'eau acidulée d'acide sulfurique et des lames de zinc amalgamé. Il suffisait de réunir celles-ci avec les extrémités libres des fils servant à suspendre les moules pour produire le courant et, par suite, le dépôt.

Aujourd'hui, les galvanoplastes se servent de piles spéciales, de couples thermo-électriques ou de dynamos, à moins qu'une distribution d'électricité ne leur permette de se passer complètement de générateurs et de n'employer que des accumulateurs destinés à être chargés en série et déchargés sous la tension voulue pour le succès de l'opération électrolytique.

On peut se rendre compte de l'économie réalisée par la dynamo sur la pile par ce fait, reconnu à la maison Christofle et Cie : avec la

pile, la production de la quantité d'électricité nécessaire au dépôt de 1 kg d'argent coûtait fr. 3,87; avec la machine Gramme, cette dépense se réduit à fr. 0,94.

Les bains reliés à une machine peuvent être groupés en série ou en dérivation. Le second procédé a l'avantage de rendre les bains indépendants, mais comme les courants employés sont souvent très intenses, on est conduit à des conducteurs coûteux et difficiles à manier.

Dans les procédés par anodes solubles, il y a avantage à combiner les deux dispositions et à placer en série des groupes de bains en dérivation. Le calcul suivant montre l'avantage de cet arrangement. Supposons, pour plus de simplicité, que la force électromotrice de polarisation soit négligeable, et appelons $r$ la résistance intérieure de chaque bain, $i$ l'intensité du courant fourni par la source. Pour un seul bain, le dépôt par seconde est $ki$, $k$ étant l'équivalent électrochimique du cuivre; la puissance dépensée est $i^2 r$ et le rendement $\frac{ki}{i^2 r} = \frac{k}{ir}$.

Si, au lieu d'un bain, on en met quatre identiques, par deux en dérivation, la résistance combinée reste la même, ainsi que la puissance dépensée. Dans chacun des bains, le dépôt n'est que moitié du dépôt primitif, mais, comme il y a quatre bains, le dépôt total est $2ki$, c'est à dire que le rendement est doublé. Si l'on associe neuf bains, par trois en dérivation, le rendement est triplé, et ainsi de suite.

Ce fait ne présente aucune contradiction avec le principe de la conservation de l'énergie, parce que le transport de cuivre d'anode à cathode, s'opérant horizontalement, ne demande aucune dépense de travail. On remarquera toutefois que le capital immobilisé augmente avec le nombre des bains.

## FORMATION DE DÉPÔTS MÉTALLIQUES.

777. — Dans les opérations électrolytiques comprises sous cette dénomination, la cathode, formée d'un objet de métal commun ou d'une substance peu résistante, telle que le plâtre, est recouverte d'un dépôt métallique destiné à la soustraire aux agents atmosphé-

riques ou à lui donner un aspect décoratif. On fait grand usage des dépôts de métaux inoxydables en vue de préserver les métaux communs contre l'action des agents atmosphériques.

Les traitements que nous considérons sont souvent confondus avec ceux qui précèdent sous le nom de galvanoplastie.

Il est indispensable, pour assurer le succès du dépôt, que la surface à recouvrir ait une conductibilité bien uniforme. Pour cela, elle doit être parfaitement nette, exempte d'oxydes ou d'enduits gras, tels que celui que laisse le contact des doigts.

Les oxydes s'enlèvent par un bain de décapage, composé d'une solution sulfurique au dixième pour le fer et ses dérivés et d'une solution nitrique faible pour le cuivre et ses alliages. Les dépôts gras s'éliminent dans un bain de dégraissage contenant une lessive alcaline. Pour des objets récemment fabriqués, on se contente souvent d'un polissage à la brosse mécanique chargée d'émeri suivi d'un bain de dégraissage au carbonate de soude et d'un rinçage à l'eau claire; après quoi l'on a soin de ne plus toucher les objets avec les doigts.

Les observations faites au sujet de la galvanoplastie, en ce qui concerne la disposition des électrodes, des bains et la conduite des opérations, s'appliquent aux dépôts métalliques.

778. — **Argenture.** — L'industrie de l'argenture galvanique a pris un développement considérable. Suivant M. Bouilhet, le poids d'argent déposé annuellement par l'électrolyse dans le monde entier serait de 125 tonnes, représentant une valeur d'environ 25 millions de francs.

Après dégraissage, décapage, nettoyage et lavage, les objets de cuivre ou de laiton à argenter sont placés dans des bains contenant des anodes solubles en argent. Les bains connus sous le nom de bains de Ruolz contiennent un cyanure double de potassium et d'argent qu'on peut obtenir en précipitant le nitrate d'argent par du cyanure de potassium et en ajoutant un excès de ce dernier de manière à arriver à une redissolution du précipité et à une réaction alcaline. Le bain doit contenir environ 30 gr. d'argent par litre; la surface des anodes est égale à celle des objets à recouvrir et le courant d'électrolyse a une densité d'un tiers d'ampère par décimètre carré.

On juge de l'épaisseur du dépôt par la quantité d'électricité utilisée dans le bain ou par une pesée.

Au sortir du bain, les pièces sont soumises au frottement d'une brosse mécanique circulaire, puis le polissage s'achève au moyen de brunissoirs en acier. On donne parfois au métal la couleur du vieil argent en passant sur la surface un pinceau humecté de sulfhydrate ammonique plus ou moins étendu, suivant la teinte cherchée.

779. — **Dorure**. — On emploie pour la dorure comme pour l'argenture des bains de cyanure double renfermant moins de 2 grammes d'or par litre. La densité du courant ne doit pas dépasser 0,8 ampère par décimètre carré de surface de cathode.

Parfois, pour les petits objets, on opère à la température de 70° à 80° C en se servant d'anodes insolubles en platine. La couleur du dépôt peut être variée du jaune pâle au rouge en faisant croître la densité du courant. On obtient des dépôts d'or vert ou d'or rouge en employant comme anodes des alliages d'or et d'argent ou d'or et de cuivre.

780. — **Cuivrage**. — Le cuivrage s'emploie pour donner un aspect artistique aux objets en fer, fonte, plâtre, zinc, plomb, et pour soustraire les premiers à l'action des agents atmosphériques. On cuivre également les objets en fer qui doivent être dorés ou argentés, parce que le fer décompose les bains d'argenture et de dorure.

Le bain de cuivrage varie avec la matière des objets à recouvrir ; on emploie fréquemment le cyanure double de potassium et de cuivre. M. Gaudoin recommande, pour le cuivrage du fer, une solution d'oxalate double de cuivre et d'ammoniaque avec excès d'acide oxalique et anode en cuivre. Lorsque le dépôt est commencé par ce procédé, on le termine dans un bain de sulfate de cuivre acide, beaucoup moins coûteux.

M. Oudry soustrait le fer à l'action de l'acide sulfurique contenu dans le bain de sulfate, en revêtant les objets d'une peinture au minium ou d'un vernis, la surface étant rendue conductrice par de la plombagine. On opère ensuite le dépôt dans un bain de sulfate de cuivre.

781. — **Nickelage.** — Le nickelage, qui donne aux objets usuels un aspect agréable et une grande inaltérabilité, et qui a pris pour ces raisons beaucoup d'extension, s'obtient au moyen d'anodes en nickel pur et d'un bain de sulfate double de nickel et d'ammoniaque, marquant une densité de 1,06 environ. Il est nécessaire de maintenir la neutralité du bain, dont on s'assure par de fréquents essais au papier de tournesol. On chauffe généralement le bain vers 40° C. Les pièces de zinc ne peuvent être nickelées qu'après avoir été cuivrées ou encore après avoir été amalgamées légèrement à la surface par immersion dans une solution mercurielle.

782. — **Cobaltage.** — Le dépôt de cobalt a une teinte plus claire que celui de nickel. Il s'obtient, d'après M. S. Thompson, dans un bain composé de la manière suivante. On fait une solution au huitième de chlorure ou de sulfate de cobalt qu'on mélange à une solution au seizième de sulfate de magnésium. Le mélange est étendu de son volume d'eau et électrolysé avec une anode en cobalt.

783. — **Platinage.** — Pour obtenir un dépôt de platine, d'iridium ou de palladium, M. S. Thompson recommande un bain chauffé entre 60° et 90° C et contenant 2 parties de chlorure du métal à déposer, 16 parties de borate sodique, 16 de carbonate sodique, 2 de sel ammoniaque et 150 d'eau. On ne peut entretenir la richesse du bain par une anode en platine, à cause de l'insolubilité de ce métal. Il en résulte que la liqueur s'appauvrit rapidement, ce qui rend le dépôt défectueux.

Pour remédier à ce défaut, M. Wahl a eu l'idée d'utiliser la solubilité de l'hydrate de platine dans les alcalis et les acides (potasse, acide oxalique ou phosphorique), en vue de maintenir constante la composition du bain. Celui-ci est, par exemple, formé de 50 gr. d'acide phosphorique sirupeux ($d = 1,7$), de 12 à 15 gr. d'hydrate de platine et de 1 kg d'eau distillée. La dissolution est faite à 100° C. Des additions successives d'hydrate entretiennent la richesse de la liqueur. On se sert d'une anode en charbon ou en platine. Les objets en fer, en nickel ou en zinc doivent être cuivrés au préalable.

784. — **Gravure et incrustation galvaniques.** — Lorsque certaines parties des électrodes en cuivre d'un bain cuivrique sont enduites d'un vernis isolant, elles échappent à l'action de l'électrolyse qui,

dans les parties non vernies, creuse l'anode et donne du relief aux cathodes.

On déduit de cette observation un moyen de graver, soit en creux, soit en relief. Ainsi, pour obtenir une planche en relief, il suffit de la recouvrir d'un vernis isolant, de tracer le dessin voulu avec un burin et de mettre la planche dans un bain où elle sert de cathode. Une autre application est le damasquinage des métaux. Si l'on réunit une plaque de cuivre, gravée en creux par le procédé précédent et encore recouverte de l'enduit isolant, à la cathode d'un bain d'argenture, l'argent se dépose dans le creux et reproduit le dessin en incrustation.

## RAFFINAGE DES MÉTAUX.

**785. — Raffinage du cuivre.** — Avant d'aborder la description du raffinage des métaux et du traitement électrolytique des minerais, opérations auxquelles on restreint souvent le nom d'électro-métallurgie, rappelons sommairement les phases de la métallurgie ordinaire du cuivre, celui des métaux usuels auquel on a appliqué les méthodes d'électrolyse par voie humide avec le plus de succès.

Cette métallurgie consiste en une série de grillages au réverbère, ayant pour but l'oxydation des minerais et l'élimination des matières volatiles, surtout du soufre, suivis chacun d'une fusion par laquelle on élimine les scories en débarrassant le cuivre des métalloïdes et des métaux auxquels il est allié. La teneur en cuivre va en augmentant avec le nombre des opérations, mais de plus en plus lentement; ainsi, la première fusion peut élever la proportion de cuivre de 10 à 60 pour cent, tandis que le dernier raffinage n'enlève que quelques centièmes d'impuretés. Néanmoins, la consommation de combustible et le déchet en cuivre restant sensiblement les mêmes pour chaque fusion, il s'ensuit que le prix de revient du métal augmente rapidement avec le degré de pureté.

Le raffinage électrolytique a pour but de tirer du cuivre pur des cuivres bruts industriels.

Ceux-ci sont coulés en plaques et employés comme anodes d'un bain de sulfate cuivrique dont la cathode est formée par une lame

mince de cuivre déjà affiné. Le métal est transporté d'une électrode à l'autre et les impuretés tombent sous forme de boues au fond de la cuve électrolytique ou restent en solution.

Par cette opération, on obtient un métal exceptionnellement pur, qui, à cause de sa grande conductibilité électrique, a une valeur beaucoup plus considérable que le cuivre ordinaire. De plus, on peut recueillir dans les boues les plus petites teneurs en métaux précieux des cuivres bruts.

Les cuivres bruts à raffiner ne contiennent généralement pas moins de 96 pour 100 de cuivre pur et les impuretés se composent de soufre, arsenic, antimoine, bismuth, platine, or, argent, étain, fer, cadmium, cobalt, zinc, aluminium, etc. Dans une solution acidulée de sulfate de cuivre, le zinc, le fer, le cadmium, le cobalt, ainsi que les métaux plus positifs se dissolvent directement pendant l'électrolyse [1]. L'antimoine, le bismuth, l'étain et la silice se dissolvent imparfaitement; le carbone, l'or, le platine et le soufre sont insolubles et se précipitent complètement. La présence du fer et du manganèse à l'anode donne lieu à des sels ferriques et manganiques qui se réduisent à l'état de protosels à la cathode en absorbant une partie de l'énergie du courant. Le fer ne se dépose que lorsque cette transformation est complète. C'est l'arsenic, l'antimoine et le bismuth qui, parmi les corps étrangers, se réduisent le plus facilement à la cathode, et il convient d'employer une densité de courant d'autant plus faible que ces corps sont en proportion plus forte. Au bout d'un temps plus ou moins long, l'électrolyte se charge d'impuretés, au point de favoriser la réduction de celles-ci, en vertu d'une action de masse, et il est nécessaire de renouveler la solution.

La force électromotrice de polarisation des bains étant faible, il y a avantage, ainsi qu'on l'a vu au § 776, à réduire la densité de courant, en vue de diminuer la dépense de puissance motrice. Toutefois, à mesure qu'on diminue la densité de courant, on augmente le capital immobilisé en terrains, en matériel et en cuivre, pour une production donnée. Il y a donc une juste limite

---

[1] GORE, *The electrolytic separation of metals*. Londres, 1890.

à garder pour la densité, qui sera d'autant plus faible que la force motrice est plus chère et que les cuivres à raffiner sont plus chargés d'impuretés, particulièrement d'arsenic, d'antimoine et de bismuth. Dans les usines favorisées au point de vue de la force motrice et où l'on traite des anodes à 98 pour 100 de cuivre, exemptes des impuretés ci-dessus, la densité va jusque 1 ampère par $dcm^2$ de cathode. Dans les cas extrêmes, on descend jusqu'au dixième de cette valeur. La dépense d'énergie varie dans les usines existantes entre 170 et 470 watts-heure par kilogramme de cuivre. La surface occupée oscille entre 0,6 et 3 $m^2$ par tonne de cuivre raffiné annuellement.

La force électromotrice choisie aux générateurs sera suffisante pour que les dimensions des bains ne soient pas trop fortes et que les conducteurs soient maniables. On installe généralement 60 à 120 bains en tension pour une production de 1 tonne par 24 heures. Les dynamos sont enroulées en dérivation pour permettre le réglage du champ magnétique et pour éviter les renversements de pôles par une force contre-électromotrice; elles développent une tension de 0,3 à 0,5 volt par cuve de la série. Elles sont construites de manière à pouvoir fonctionner jour et nuit sans arrêt.

Les cuves sont en bois, garnies intérieurement de feuilles de plomb soudées au chalumeau d'hydrogène. Elles contiennent souvent 8 anodes coulées avec des saillies qui reposent sur les bords des cuves et 9 cathodes suspendues dans le liquide par des bandelettes de cuivre fixées à des tiges appuyant également sur les bords. Les anodes sont plus épaisses vers le haut où, comme on l'a vu, la corrosion est plus rapide. Elles ont chacune 10 à 15 kg, poids qui permet de les manier aisément.

La liqueur cuivrique acidulée a une densité variant de 1,12 à 1,19. Elle doit être chauffée l'hiver, par des injections de vapeur, à 20 ou 25° C. Une circulation de liquide est établie dans les bacs pour assurer l'homogénéité des bains. Dans ce but, on dispose parfois les cuves en cascade, en établissant un écoulement entre les bains à l'aide de syphons. Le liquide de la cuve inférieure est remonté au niveau du bain supérieur par un injecteur. On peut aussi syphonner indépendamment le liquide du fond de chaque bain, comme on le fait dans les piles, § 277; ce procédé amène une homogénéité plus grande entre la composition des divers bains.

Les électrodes sont surveillées afin d'éviter des courts circuits provenant de fragments qui se détachent des anodes par une usure irrégulière de celles-ci. On a soin d'ailleurs de laisser au moins 5 cm entre les électrodes pour diminuer la fréquence de cet accident. Après un certain temps, on vide les bains pour remplacer la solution devenue impure et l'on recueille les boues qu'on sèche et dont on retire éventuellement l'or et l'argent par la coupellation.

Comme moyen d'épuration M. Thofehrn envoie dans la solution contenue dans le bassin inférieur de la cascade des bains un jet d'air qui précipite par oxydation une partie du fer et d'autres impuretés.

Suivant M. Gore, pour raffiner 30 tonnes de cuivre par semaine avec une densité de courant de 1 ampère par $dcm^2$ de cathode, il faut immobiliser 400 tonnes de cuivre, ce qui, à 1 250 fr. la tonne, donne un capital de 500 000 fr., auquel il faut ajouter 250 000 fr. pour le matériel, les bâtiments, etc. Une telle installation occupe une vingtaine d'ouvriers et un chimiste : elle demande une force motrice de 200 chevaux environ. Le prix moyen du raffinage électrolytique est d'environ 0,10 fr. par kg de métal.

Parmi les premières usines qui ont appliqué le raffinage électrolytique, la Nord-Deutsche Affinerie, de Hambourg, produit 2,5 tonnes par jour et recueille dans les résidus plus de 1 000 kilogrammes d'or par an. Actuellement, les principales usines à cuivre font le raffinage par l'électricité.

786. — **Procédé Elmore.** — M. Elmore utilise la précipitation électrolytique pour fabriquer directement des tubes de cuivre d'une qualité exceptionnelle et sans soudure longitudinale. Dans ce but, il emploie des cathodes cylindriques disposées entre des anodes planes et animées d'un mouvement de rotation. Des galets fixes en agathe appuient sur les cathodes, de manière à resserrer la texture du métal qui se dépose et à accroître sa ductibilité et sa tenacité. Comme électrode négative M. Elmore fait usage de tubes en acier poli qu'on peut détacher du dépôt par différence de contraction dans l'eau froide. La première couche de dépôt est obtenue dans un bain de cyanure qui n'attaque pas la cathode. On continue l'opération dans un bain de sulfate de cuivre.

Les tubes fabriqués par ce procédé peuvent supporter, avant de

se rompre, des charges de 50 kg par $mm^2$, en présentant des allongements de 7 pour 100.

On réalise des plaques de cuivre en fendant des tubes de grand diamètre, qu'on redresse. Les fils s'obtiennent en découpant les tubes suivant des hélices qu'on recuit et qu'on tréfile.

787. — **Raffinage du plomb.** — M. Keith a proposé de raffiner les plombs bruts dans une dissolution de sulfate de plomb dans l'acétate sodique. Ce raffinage n'accroît pas la valeur du métal, car on a vu que les métaux étrangers en petites proportions donnent au plomb une élasticité favorable dans beaucoup d'applications, § 534; mais le traitement permet d'extraire les corps étrangers, tels que l'or, l'argent, l'antimoine et l'arsenic, qui restent dans les boues sous l'anode de plomb brut. Ces boues sont traitées au creuset avec du nitrate sodique et du borax. Le zinc et le fer mélangés au plomb brut restent en solution.

## TRAITEMENT DES MINERAIS.

788. — L'extraction des métaux de leurs minerais par la voie électrolytique a fait l'objet, dans ces dernières années, de tentatives intéressantes. Ce mode de traitement est surtout avantageux là où des forces naturelles permettent d'obtenir l'énergie électrique à bon compte, ce qui arrive fréquemment dans les pays riches en minerais mais dépourvus de combustibles.

Les premières études des traitements électrométallurgiques sont dues à M. Becquerel, qui avait proposé, en 1854, de réduire les minerais d'argent, amenés à l'état de chlorures et dissous dans une solution concentrée de chlorure sodique, à l'aide d'un courant produit dans le bain même par des lames de zinc, § 776. L'argent se dépose sur la cathode en plomb ou en charbon.

Un procédé semblable ne peut, naturellement, être employé que lorsque la force électromotrice de décomposition du sel est inférieure à celle du couple zinc-chlorure sodique-plomb.

On a, à diverses reprises, préconisé des modes de traitement analogues consistant à mettre les minerais en solution dans l'eau, après les avoir transformés en sulfates par le grillage ou en chlorures

par l'acide chlorhydrique pur, et à les électrolyser par le courant d'une dynamo en faisant usage d'une anode insoluble en charbon ou en plomb.

Ces procédés mettent en jeu des forces électromotrices de polarisation plus ou moins considérables et conduisent à une dépense d'énergie souvent inadmissible, surtout lorsque la polarisation est supérieure à 1,5 volt et que l'eau du bain est décomposée. Dans ce dernier cas, il y a un travail effectué en pure perte, et les gaz provenant de la décomposition de l'eau empêchent d'obtenir des dépôts convenables.

Cependant M. Alex. Watt prétend avoir obtenu de bons dépôts de zinc par l'électrolyse de l'acétate de ce métal. Les minerais oxydés ou amenés à l'état d'oxydes par le grillage sont dissous dans l'acide acétique du commerce; le plomb et le fer sont éliminés par l'hydrogène sulfuré et la liqueur est ensuite traitée avec une anode en charbon.

MM. Blas et Miest ont fait breveter, en 1882, un mode de traitement très ingénieux, applicable aux minerais sulfurés et à l'aide duquel on parvient à tourner la difficulté. Ils ont remarqué que les sulfures métalliques sont en général assez conducteurs, et qu'on peut les employer comme anodes dans une solution du métal à réduire, le bain servant uniquement de véhicule au métal qui se transporte de l'anode en sulfure à la cathode. Le soufre provenant de la décomposition du sulfure tombe en boue au fond de la solution. Si l'on traite par ce moyen le sulfure cuivrique, la force électromotrice de décomposition n'est que 0,22 volt, au lieu de 1,22 volt, force électromotrice minima nécessaire pour décomposer le sulfate avec une anode en charbon. Le traitement de MM. Blas et Miest procure donc une notable économie de force motrice ainsi que la suppression de l'électrolyse de l'eau.

Ce système a été perfectionné par M. Marchese, qui l'a applique dans diverses usines en Italie.

789. — **Traitement des sulfures de cuivre.** — Le procédé Marchese est appliqué à Sestri-Levante (Italie) à des chalcopyrites à gangue serpentineuse mélangées à la pyrite de fer, et dont la teneur moyenne en cuivre est de 15 pour 100.

Les minerais sulfurés sont fondus au four à manche, puis les

mattes sont coulées dans des moules de fonte en plaques qui doivent servir d'anodes. Ces plaques, dont la conductibilité électrique est suffisante, communiquent avec le circuit extérieur par des bandelettes de cuivre emprisonnées dans les anodes pendant la fusion. Les mattes contiennent environ 35 parties de cuivre, 38 de fer et 27 de soufre.

Le bain électrolytique est obtenu en traitant au four à réverbère à étages des minerais riches et en soumettant les produits du grillage à l'action de l'acide sulfurique dilué dans des récipients en plomb à grande surface ; le traitement au réverbère doit être conduit de manière à obtenir des oxydes, et non des sulfates, afin d'éliminer autant que possible le fer dont l'oxyde n'est pas soluble dans l'acide sulfurique étendu. La solution de sulfate de cuivre contenant du sulfate de fer est amenée dans des bacs de traitement dont les cathodes sont constituées par des lames de cuivre pur peu épaisses, placées dans des cadres en bois pour éviter leur gondolement.

La présence de la pyrite de fer dans les mattes sulfurées nécessite de grandes précautions dans la conduite des opérations, afin d'éviter que le fer ne se dépose avec le cuivre sur la cathode.

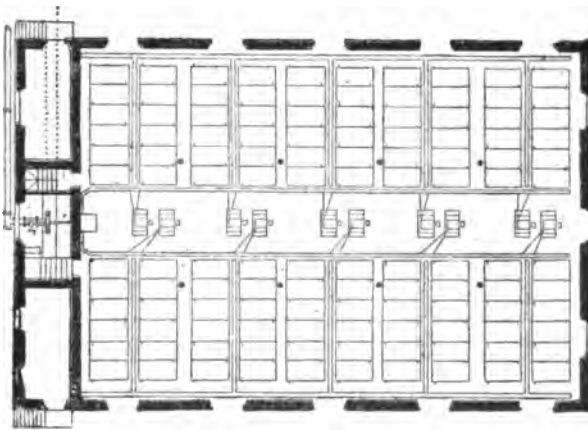


Fig. 520.

Le sulfure de fer est décomposé et le fer passe dans le bain à l'état de sulfate ferrique qui tend à se réduire en sulfate ferreux et en fer à la cathode. Le sel cuivrique de la solution se réduit donc peu à peu et est remplacé par des sels de fer.

De nombreuses expériences ont montré que le dépôt de cuivre reste net et brillant tant qu'il subsiste environ 0,5 pour 100 de cuivre dans la solution. On peut réaliser cette condition en provoquant un renouvellement continu des liquides dans les bacs électrolytiques, par une circulation établie entre ces bacs et les bassines de dissolution en plomb, où le sulfate ferrique dissout une certaine quantité de cuivre. La solution est amenée par un chenal en bois aux bacs disposés en cascades par séries de six, fig. 520; après avoir traversé ceux-ci, elle est reprise par des pompes centrifuges qui la ramènent aux bassins de dissolution. Elle doit être renouvelée de temps à autre, parce qu'à la longue elle se sature de sulfate ferreux, et, dans cet état, ne dissout plus de cuivre.

Le courant est fourni par 20 machines Siemens, excitées en dérivation afin d'éviter les renversements de pôles dans les inducteurs. Chaque dynamo dessert 12 bacs réunis électriquement en série et précipite journellement 100 kg de cuivre en développant 10 volts aux bornes et 250 ampères; la différence de potentiel entre les bornes de chaque bac électrolytique est donc inférieure à 1 volt. La force électromotrice de polarisation est faible, 0,45 volt environ.

D'après les données citées ci-dessus, la dépense d'énergie est

$$\frac{10 \cdot 250 \cdot 24}{100} = 600 \text{ watts-heure par kilogramme de cuivre.}$$

En admettant que cette énergie est produite par des machines à vapeur consommant 1 kg de charbon par cheval-heure et des dynamos d'un rendement industriel de 90 pour 100, la consommation du combustible sera

$$\frac{600}{736} \times \frac{100}{90} = 0,91 \text{ kg.}$$

Le traitement des sulfures par la méthode ordinaire exige environ 3 kg de charbon, soit 3 fois plus que la méthode électrolytique, laquelle permet d'ailleurs d'utiliser des forces naturelles. Par contre, celle-ci fournit plus de déchets que la première par suite de la désagrégation des mattes soumises à l'électrolyse. On estime que 10 à 50 pour 100 des mattes tombent dans les bains, ce qui trouble les solutions et altère la qualité des dépôts. Il est

d'ailleurs difficile de retirer les métaux précieux contenus dans les déchets.

Lorsque la solution est devenue trop riche en sulfate de fer, elle est soumise à l'action électrolytique dans des bacs contenant des anodes en fer, puis, enfin, elle est amenée dans des cuves contenant de la ferraille qui précipite les dernières traces de cuivre. Les résidus des anodes sont ajoutés aux minerais dont les produits du grillage, envoyés dans des chambres de plomb, donnent de l'acide sulfurique. Une partie de ce dernier est utilisée pour la préparation de la solution électrolytique.

En résumé, les produits de cette industrie sont : 1° du cuivre pur obtenu avec une perte de métal assez faible et une consommation de combustible minime ; 2° de l'acide sulfurique ; 3° du sulfate de fer.

Nous avons exposé, avec quelque développement, ce procédé, bien qu'il soit encore dans la phase des essais, afin de montrer les difficultés qu'un traitement métallurgique, théoriquement très simple, peut présenter dans l'application. La composition des minerais de cuivre présente, en effet, des variations qui exigent des modifications continuelles dans la conduite du traitement et occasionnent des difficultés dont une longue expérience peut seule venir à bout.

## ÉLECTROMÉTALLURGIE PAR VOIE SÈCHE.

**790. — But.** — Les procédés de l'électrométallurgie par voie humide sont soumis à des restrictions nombreuses. On est obligé de modérer la densité du courant de crainte qu'il ne se forme des réactions secondaires capables d'altérer le produit déposé. De là, la nécessité de bains de grande étendue pour développer un effet utile donné. Le liquide des bains doit être choisi avec soin et surveillé au cours des opérations afin qu'il n'attaque pas les produits de l'électrolyse. Enfin, la réduction par voie humide est impraticable avec les métaux ayant une grande affinité pour l'oxygène.

Lorsqu'il est possible de fondre les matières à traiter et de leur donner une conductibilité suffisante pour qu'elles se prêtent au

passage de courants intenses, la réduction peut s'opérer par voie sèche entre des électrodes en charbon; la chaleur dégagée par le courant vient alors en aide à l'action électrolytique de ce dernier et ces effets combinés ont une telle puissance de désagrégation qu'aucun composé ne leur résiste.

L'application de ces procédés a fait accomplir des progrès importants à la métallurgie des minerais irréductibles par le charbon; tel est le cas des composés alcalins, alcalino-terreux et terreux, dont les éléments électro-positifs forment avec l'oxygène des combinaisons dégageant plus de chaleur que l'oxydation du carbone et qui, en vertu du principe du travail maximum, ne le cèdent pas à ce dernier.

L'électrolyse par voie sèche n'est pas subordonnée aux mêmes conditions que l'électrolyse par voie humide. On n'a pas à se préoccuper des réactions d'un dissolvant sur les produits de la réduction et la densité du courant n'est limitée que par le pouvoir conducteur des électrodes, ce qui implique plus de latitude dans la conduite des opérations.

Le prix élevé de l'énergie électrique sous forme de chaleur ou d'agent réducteur semble, à première vue, devoir limiter son emploi aux métaux pour lesquels le charbon est impuissant. En effet, il n'y a guère que les huit centièmes de l'énergie du combustible brûlé dans une chaudière qui soient utilisés dans le circuit extérieur d'une dynamo. Mais il ne faut pas perdre de vue que, dans les fourneaux métallurgiques, une grande partie de la chaleur du combustible est employée à échauffer la maçonnerie des fours et le combustible lui-même, et, qu'en raison de la surface des appareils utilisés, les pertes par rayonnement sont considérables.

Au contraire, l'énergie voltaïque peut être concentrée dans un espace très restreint et employée presque toute entière au but en vue. En outre, la réduction a lieu en une seule opération, tandis que certaines métallurgies exigent des refontes très onéreuses en combustible, §§ 785 et 789. Enfin, l'utilisation des chutes d'eau réduit considérablement les frais de production de l'électricité et permet de traiter des minerais dans des pays dépourvus de charbon.

Ces considérations montrent qu'il n'est pas impossible que les procédés électrométallurgiques par voie sèche s'étendent au traitement de certains métaux usuels. Jusqu'à présent, ils sont restreints

presque exclusivement à la production de l'aluminium. Nous allons passer en revue des méthodes appliquées dans ce but, en nous renseignant, comme nous avons eu plusieurs fois l'occasion de le faire au cours de cet ouvrage, dans les articles érudits de M. Richard, parus dans *la Lumière Électrique*, ainsi que dans la monographie de l'aluminium, publiée par M. Minet dans le même journal.

791. — **Généralités sur l'aluminium et ses emplois.** — L'aluminium, qui est probablement le plus répandu des métaux qui entrent dans la composition de la croûte terrestre, jouit de propriétés telles qu'il a pu être appelé le fer de l'avenir.

Sa faible densité (2,67) et sa tenacité (20 kg par $mm^2$) le rendent, à poids égal, aussi résistant que l'acier. Sa conductibilité électrique, qui est la moitié de celle du cuivre, doit le faire préférer à ce dernier métal, lorsque la considération de poids est prédominante. Son inaltérabilité aux agents atmosphériques et sa malléabilité, jointes à ses autres qualités, le rendent précieux pour la confection des instruments de précision. Enfin, son innocuité et son bel éclat blanc le destinent à un grand nombre d'usages domestiques et artistiques.

Cependant, à cause de son prix élevé, l'aluminium n'est guère employé, jusqu'à présent, à l'état pur; mais, en revanche, il est utilisé à l'état de combinaison, soit directement, soit dans la métallurgie d'autres métaux.

L'aluminium forme, avec le cuivre, le zinc et le fer, des alliages stables, non susceptibles de liquation et qui jouissent de propriétés tout à fait remarquables

Les alliages d'aluminium et de cuivre sont connus sous le nom de bronzes d'aluminium. Lorsqu'on incorpore, au creuset, 10 pour 100 d'aluminium dans le cuivre, l'alliage se forme avec un dégagement de chaleur violent qui accuse une combinaison définie. Le produit a une belle couleur d'or; il est susceptible de prendre un poli brillant qu'il conserve sans altération à l'air. Ce métal résiste, en outre, aux gaz sulfurés, aux acides faibles ou gras, aux savons et à l'eau de mer. Ces propriétés restent acquises à l'alliage tant que la teneur en aluminium ne descend pas en dessous de 5 pour cent. Le retrait du bronze d'aluminium est toutefois assez fort; il atteint 2 pour 100 pour le bronze à 10 pour 100.

Au point de vue des propriétés mécaniques, les bronzes d'aluminium, unis à une petite proportion de silicium, tels qu'on les obtient par le procédé Cowles ci-après, sont susceptibles de présenter des caractères très variables avec la composition. Le bronze contenant 10 pour 100 d'aluminium et 1 à 2 pour 100 de silicium est peu malléable et résiste à une charge de 80 kg par $mm^2$, avec un allongement qui va jusque 5 pour 100.

Lorsque la teneur en silicium reste égale à 1 pour 100 et que la proportion d'aluminium tombe à 2,25 pour 100, le métal ne résiste plus qu'à 20 kg par $mm^2$, mais il est extrêmement ductile et l'allongement avant la rupture va jusque 60 pour 100. Entre ces limites extrêmes, il est possible d'obtenir une échelle de produits, dont on règle les qualités mécaniques selon le but en vue. Les bronzes d'aluminium se moulent et se travaillent aisément.

Le laiton d'aluminium, contenant 3 à 4 pour 100 de ce métal et 40 pour 100 de zinc, possède une limite d'élasticité allant jusqu'aux quatre cinquièmes de la charge de rupture, laquelle est voisine de 50 kg par $mm^2$.

L'argentan d'aluminium contenant 95 pour 100 de ce métal et 5 pour 100 d'argent a l'aspect de l'argent, mais il est plus dur et moins lourd. M. W. Langley a trouvé qu'un alliage de 90 d'aluminium et 10 de titane présente l'élasticité de l'acier trempé, tout en étant plus fusible et plus malléable.

Enfin le composé qui a trouvé le plus d'applications est le ferro-aluminium, alliage riche d'aluminium et de fer, qu'on peut obtenir en une seule opération et qui sert d'intermédiaire pour incorporer de petites quantités d'aluminium dans le fer.

L'addition, au dosage voisin du millième, de l'aluminium au fer et à ses carbures, l'acier et la fonte, jouit de la propriété caractéristique d'abaisser le degré de fusion de ces corps, de leur donner de la fluidité et de l'homogénéité et de permettre d'obtenir des moulages nets et sans soufflures.

Le rôle de l'aluminium dans le fer est complexe. Il paraît à peu près certain qu'il se forme une combinaison qui, comme tous les alliages, possède un point de fusion inférieur à ceux des métaux composants. Mais, en outre, l'aluminium jouit, comme le silicium et le manganèse, mais à un degré plus élevé, de la propriété d'absorber l'oxygène emprisonné dans le fer à l'état d'air, d'oxyde

de carbone ou d'oxyde métallique et de purifier le métal, en formant une scorie d'alumine qui surnage.

Il est possible que cette combinaison apporte dans le bain en fusion une quantité de chaleur suffisante pour entretenir sa fluidité et lui permettre de se mouler aisément.

En ajoutant 0,0005 à 0,0014 d'aluminium sous forme de ferro-aluminium dans des creusets en plombagine contenant du fer et chauffés au four à réverbère, M. Ostberg est arrivé à faire tomber le degré de fusion du métal de 1 700° C à 1 400° C et à obtenir un bain homogène d'une fluidité remarquable, susceptible d'être coulé dans les moules les plus compliqués. Le fer ainsi obtenu, désigné par son inventeur sous le nom de *fer mitis*, se soude et se travaille comme le fer ordinaire dont il possède la résistance et ne diffère que par sa texture homogène et grenue.

L'introduction du ferro-aluminium dans les poches de coulée de l'acier obtenu par les divers procédés (Bessemer, Martin, au creuset) empêche le métal de rocher, l'affine et lui donne une homogénéité et une ténacité exceptionnelles, tout en permettant d'obtenir des moulages sans soufflures, ce qui rend les aciers propres à certains usages nouveaux, tels que la coulée des carcasses de dynamos.

La proportion d'aluminium ainsi ajoutée varie avec la composition des bains, mais ne s'éloigne jamais beaucoup du millième. Le ferro-aluminium est chauffé avant son introduction dans la poche de coulée et le bain est brassé avec des ringards en fer.

Enfin, un traitement identique améliore considérablement les fontes et jouit de la propriété de transformer la fonte blanche en fonte grise. Il augmente la résistance transversale de la matière, lui permet de mieux résister aux chocs, diminue le retrait, ce qui facilite les moulages et rend le grain fin et régulier. C'est à l'aide de ce procédé que les Américains sont arrivés à produire les belles pièces de fonte décorative qu'on observe entr'autres dans les poêles qu'ils importent chez nous.

Les minerais d'aluminium les plus purs sont le corindon ou alumine cristallisée (formule électrolytique : $Al\frac{2}{3}O$), la bauxite ou alumine hydratée et la cryolithe ou fluorure double d'aluminium et de sodium (formule électrolytique : $Al\frac{2}{3}Fl$, Na Fl).

Dans les procédés de traitement électrométallurgique, les minerais sont fondus sous l'action du courant seule ou par l'action successive de la chaleur empruntée au charbon et de celle produite par le courant. Les effets calorifiques et électrolytiques du courant sont ensuite combinés pour séparer les éléments et isoler l'aluminium ou l'unir au métal qui doit former la base d'un alliage riche.

792. — **Procédé Cowles.** — Le procédé Cowles, appliqué à Stoke-on-Trent (Angleterre), où le charbon ne coûte que 5 à 6 fr. la tonne, est basé sur l'application de l'action combinée de la chaleur voltaïque et du pouvoir réducteur du charbon à la décomposition de la bauxite.

L'opération s'effectue dans une série de fourneaux quadrangulaires en terre réfractaire visibles dans la fig. 521. Ces foyers, de 1,70 × 0,80 × 0,50 m, sont garnis intérieurement d'un revêtement réfractaire et peu conducteur obtenu en délayant du charbon

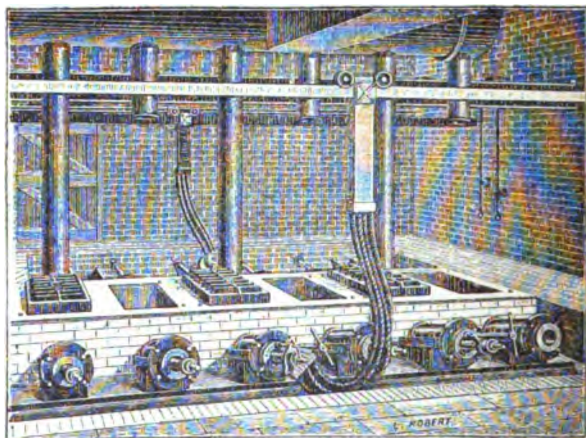


Fig. 521.

de bois dans un lait de chaux. Les ouvertures supérieures se ferment à l'aide de couvercles métalliques à garniture réfractaire, percés d'orifices pour le dégagement des gaz.

Chaque foyer porte deux tubulures latérales en fonte dans lesquelles glissent des faisceaux formés de 9 crayons de charbon de 65 millimètres de diamètre. Les deux faisceaux, inclinés à 30°,

peuvent être rapprochés ou éloignés à l'aide de vis de réglage dont on voit les poignées à l'avant de la figure. Les charbons sont réunis par des têtes métalliques coulées sur les faisceaux de manière à les emprisonner et reliées à des câbles de cuivre qui reçoivent le courant par des rails de cuivre sur lesquels glissent des chariots soutenant les conducteurs. Un seul foyer fonctionne à la fois.

Le courant est produit par une puissante dynamo de 300 kilowatts (5 000 ampères $\times$ 60 volts) commandée, par l'intermédiaire de cordes de chanvre, par un moteur de 600 chevaux, lequel est pourvu d'un volant de 30 tonnes, afin de parer aux à-coups produits par les brusques variations du courant, qui peut atteindre 8 000 ampères à certains moments. Au-delà de cette intensité, des lames de sûreté en plomb rompent le circuit.

Dans toutes les opérations électrolytiques par voie sèche donnant lieu à des variations de courant soudaines, il serait avantageux, au point de vue de la bonne utilisation des machines et de leur conservation, d'adopter des accumulateurs en dérivation sur la dynamo. Ce procédé, dont on a déjà vu l'application dans les distributions, § 504, et pour l'alimentation des moteurs de tramway, § 618, permet de développer momentanément un courant dépassant beaucoup la capacité de production des machines, de sorte que celles-ci peuvent marcher à une allure constante sous le rendement maximum.

Pour préparer une opération, on forme la brasque de la sole à l'aide du charbon chaulé, puis on amène les électrodes en contact et l'on place au milieu du four un gabarit en tôle autour duquel on bat également une garniture de charbon. On enlève ensuite la forme et on verse dans la chambre ainsi ménagée un mélange de charbon, de bauxite et de cuivre ou de fer, suivant qu'on veut obtenir du cupro-aluminium (bronze riche) ou du ferro-aluminium. On recouvre encore le mélange de charbon et on ferme le four en ayant soin de luter le couvercle.

On relie ensuite les faisceaux de charbons à la dynamo et on les écarte progressivement à mesure que la masse entre en fusion. Sous l'effet de la chaleur intense, ainsi que de l'action réductrice du charbon et du courant, le minerai se décompose et le métal s'unit, avec un peu de silicium réduit, au cuivre ou au fer du bain.

L'opération prend une heure et demie et exige un courant croissant jusque 5 000 ampères.

Les gaz dissociés s'échappent avec de l'alumine par les ouvertures ménagées dans le couvercle et produisent une flamme brillante. On a soin de retirer les électrodes lorsqu'on arrête le courant, afin qu'elles ne soient pas prises dans le bain pendant le refroidissement.

Lorsque l'opération est terminée, on recueille le lingot d'alliage blanc et cassant, contenant 18 à 30 pour cent d'aluminium, qu'on refond au creuset ou au réverbère avec un poids de cuivre propre à donner les alliages commerciaux couleur d'or. Pour juger de la qualité de ceux-ci, on se contente de prélever des éprouvettes dans le bain de seconde fusion et de les soumettre à des essais mécaniques.

La scorie retirée du four Cowles consiste en un mélange d'alliage et de charbon. Elle est concassée et retraitée avec du minerai nouveau.

La production du kilogramme de bronze riche demande 45 chevaux-heure électriques. Celle d'un kilogramme de ferro-aluminium, 65 chevaux-heure. On a soin de ne pas fabriquer les deux alliages dans le même four, afin d'éviter que du fer ne souille le premier ou que le second ne soit altéré par du cuivre.

Dans les fours représentés dans la fig. 521, on était obligé de laisser refroidir le lingot dans le creuset avant de l'enlever. Actuellement, on emploie des fours ayant un orifice de coulée

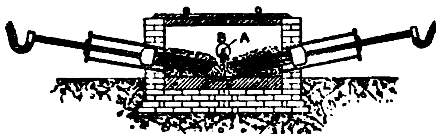



Fig. 522.

fermé par un crayon de charbon, de manière à vider le creuset immédiatement après l'opération, ce qui permet de refaire la brasque sans perte de temps.

M. Crompton a préconisé un creuset représenté dans la fig. 522 et qui se prête au chauffage préalable des matières au moyen d'un chalumeau à gaz A B, de manière à économiser de la chaleur voltaïque.

Dans le procédé Cowles, le traitement est intermittent. Il est très désirable d'arriver à l'emploi de fours à action continue, afin d'éviter les réchauffages des massifs de maçonnerie et d'accroître la production ; on verra ci-après les tentatives faites dans cet ordre d'idées.

793. — **Électrolyse des composés alumineux en fusion ignée. Méthode Minet.** — Le procédé Cowles n'utilise pas l'action réductrice du courant de la même manière que les électrolyses ordinaires dans lesquelles le métal se rend à la cathode, et il est assez difficile de faire la part de l'effet calorifique et de l'effet électrolytique dans ce mode de traitement, où le produit obtenu n'est pas un métal pur.

M. Minet, reprenant une méthode essayée sans résultats par Sainte-Claire Deville à une époque où les générateurs d'électricité étaient insuffisants, est parvenu à produire industriellement l'aluminium par l'électrolyse, entre des électrodes de charbon, des composés de ce métal maintenus en fusion.

Le bain est formé de cryolithe qui fond à 900° C si l'on y ajoute 60 pour 100 de chlorure sodique. Le mélange ne commence à se volatiliser qu'à 1 100°, de sorte qu'en le maintenant aux environs de 1 000° on est certain que la perte de matière par sublimation sera peu importante.

Le mélange est placé dans une cuve en fonte de fer quadrangulaire scellée dans un fourneau réfractaire et garnie intérieurement de plaques de charbon servant de cathode. Les anodes suspendues dans le mélange sont des prismes parallèles de charbon artificiel. Sous la cuve est un creuset destiné à recevoir l'aluminium et pourvu d'un trou de coulée. Le composé est amené à la température de fusion par le foyer. La chaleur développée par le courant suffit ensuite pour maintenir l'électrolyte en fusion. Celui-ci se décompose et l'aluminium, qui se dépose à l'état liquide sur la cathode, tombe en gouttelettes dans le creuset. On surveille aisément l'opération, grâce à la transparence du sel fondu.

On ne peut entretenir le bain avec de la cryolithe pure, car, au fur et à mesure de la réduction de l'aluminium, le mélange s'enrichit en fluorure sodique et le sodium finit par se deposer à la cathode. M. Minet tourne cet écueil en entretenant le bain avec de la bauxite ou un mélange de bauxite et de fluorure d'aluminium.

La différence de potentiel à créer aux électrodes est représentée par

$$v = e + r i,$$

où $e$ exprime la force électromotrice de décomposition du sel, laquelle est voisine de 2 volts, et $r$ sa résistance.

La différence de potentiel ne doit pas dépasser sensiblement 4,35 volts, sinon on décompose le chlorure sodique qui domine dans le bain.

En modifiant la température de l'électrolyte entre 900° et 1 000°, M. Minet a reconnu que le coefficient de variation de la résistance avec la température se déduit de la formule suivante

$$r = \alpha - \beta t = 0{,}0143 - 0{,}000011\, t.$$

La densité de courant atteint 50 ampères par $dcm^2$ à la cathode. Elle n'est limitée que par la conductibilité des électrodes auxquelles on donne une forte section.

L'équivalent électrochimique de l'aluminium est 0,095 milligramme. Le dépôt observé varie de 0,55 à 0,60 de ce chiffre lorsqu'on emploie une cathode en charbon. Lorsqu'on destine l'aluminium à la production d'alliages riches, il n'y a aucun inconvénient à employer une cathode formée du métal allié. Dans ce cas, l'aluminium coule plus facilement le long de l'électrode et n'est pas soumis aussi longtemps à l'action du fluor à l'état libre dans le bain.

Le procédé suivant, qui utilise également l'électrolyse ignée, est destiné, comme le système Cowles, à la production directe des alliages riches.

794. — **Procédé Héroult.** — Le procédé de M. G. Héroult est appliqué, à Neuhausen, dans une usine qui utilise une chute du Rhin de 1 500 chevaux. Le fourneau électrique est formé d'une caisse en fonte *a*, doublée intérieurement d'un revêtement réfractaire et conducteur A, en briques de charbon aggloméré lutées au goudron. Le fourneau est fermé par une plaque de graphite *k'*, percée de deux ouvertures latérales *n*, par lesquelles on introduit les matières à traiter, et d'une ouverture centrale de forme carrée qui donne accès à une électrode formée d'un faisceau de plaques de charbon *b* réunies par des cadres métalliques.

Un orifice de coulée *c*, fermé par un tampon en charbon, permet l'évacuation des produits dans une lingotière mobile sur rails.

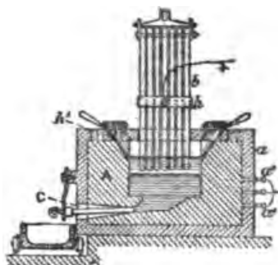


Fig. 523.

Le revêtement de charbon A communique, par la caisse de fonte et par des bornes multiples *a'*, avec le pôle négatif d'une dynamo. Le faisceau de charbons, en relation avec le pôle positif, est suspendu par un treuil et mû par un mécanisme régulateur remplissant le même rôle que celui des lampes à arc en série, § 713.

Dans ce but, le treuil est commandé par une petite dynamo à laquelle le courant arrive par un ampèremètre régulateur. Selon que le courant qui traverse le fourneau est trop fort ou trop faible, la dynamo relève ou redescend le faisceau de charbons.

Le courant principal est fourni par deux puissantes dynamos du type Brown à 24 pôles, donnant chacune 30 volts et 14 000 ampères. Elles sont excitées par une dynamo spéciale de 65 volts et 3 000 ampères. Le courant est amené au fourneau par des câbles flexibles de la grosseur du bras. Les deux grandes machines sont actionnées directement à 225 tours par des turbines Jonval de 600 chevaux. La dynamo excitatrice reçoit le mouvement d'une turbine de 300 chevaux.

On prépare une opération en chargeant au fond du creuset du cuivre en morceaux, destiné à former la base de l'alliage d'aluminium. On amène l'électrode positive sur cette couche métallique qui entre en fusion sous l'action du courant, lequel passe du faisceau mobile au revêtement conducteur; puis on verse, par les orifices *n*, la bauxite qui fond à la chaleur voltaïque et devient

conductrice. On obtient ainsi, comme le montre la figure, un bain formé d'une couche inférieure de cuivre et d'une couche supérieure de minerai en fusion, au sein duquel se déplacent les charbons positifs. Sous l'effet combiné de la chaleur et de l'électrolyse, le minerai se décompose, l'aluminium s'allie au cuivre faisant partie de la cathode, l'oxygène se porte sur les charbons supérieurs et forme de l'oxyde de carbone qui sort du creuset sous forme d'une flamme rendue blanche et éblouissante par les particules d'alumine entraînées. On produit ainsi des bronzes à 25 ou 30 pour cent d'aluminium.

Cette installation permet d'obtenir par jour 300 kilogrammes d'aluminium alliés à trois ou quatre fois ce poids de cuivre. Le four fonctionne pendant des mois sans arrêt. D'après l'inventeur du procédé, le kilogramme d'aluminium contenu dans le bronze ne reviendrait qu'à 3,50 fr. On peut préparer d'une manière analogue le ferro-aluminium.

Le procédé Héroult a été modifié, à Neuhausen, par M. Kiliani, en vue de la production de l'aluminium presque pur. Dans le fond du creuset on dispose une couche de plombagine qui sert de cathode. L'anode est formée d'un prisme de charbon aggloméré auquel on imprime un mouvement de rotation continu autour d'un axe vertical, de manière à agiter le bain et à régulariser l'action. On fond graduellement la cryolithe, qui est le minerai utilisé, en rapprochant l'anode du fond du creuset puis en l'éloignant progressivement. A l'aide d'une cuve de 0,60 m de diamètre et de 0,60 m de profondeur, on produit ainsi 20 kg d'aluminium en 24 heures avec une dépense de 50 chevaux-heure par kg d'aluminium. La différence de potentiel appliquée varie de 20 à 25 volts.

## SOUDURE ÉLECTRIQUE.

795. — **Procédé Thomson.** — Parmi les applications de l'électricité au travail des métaux, la soudure électrique, d'invention récente, a acquis une certaine importance.

Dans le procédé de M. E. Thomson, les pièces à souder, barres

ou fils métalliques, sont amincies et limées sur les faces à réunir. On maintient solidement les pièces, dans des étaux, pressées l'une contre l'autre par un ressort. On fait ensuite passer, par l'intermédiaire des étaux, un courant suffisamment intense à travers les bouts à réunir. La résistance opposée par le contact imparfait amène le joint au blanc soudant. A ce moment précis, on cesse l'envoi du courant et les pièces restent intimement unies. Si elles sont en fer, il est bon de marteler, après coup, le joint réchauffé, afin de rendre au métal son élasticité. Il reste, en tous cas, un bourrelet de métal fondu qu'on enlève à la lime.

Le courant employé par M. E. Thomson est alternatif. Il peut être obtenu à l'aide d'un transformateur dont le circuit primaire est formé par un rouleau de fil fin en relation avec un alternateur, tandis que le circuit secondaire ne comprend qu'un seul tour d'un faisceau de barres de cuivre dont les extrémités sont reliées directement aux étaux. On règle l'intensité du courant secondaire par des résistances artificielles introduites dans le circuit primaire.

Dans un des appareils utilisés par M. Thomson, la machine génératrice, tournant à 1 800 tours, peut fournir 600 volts et 20 ampères. Le circuit secondaire du transformateur ne donne qu'un volt, mais l'intensité du courant atteint 10 000 ampères, ce qui permet de souder des barres de cuivre de 11 mm de diamètre. Pour souder les pièces de petit diamètre, l'inventeur fait aussi usage du courant produit directement par une machine auto-excitatrice à courants alternatifs, dont l'induit est formé de gros fil.

Le procédé de M. Thomson se prête à la soudure des conducteurs électriques et des tuyaux de conduite. Il permet de réparer des objets brisés, tels que des outils, des arbres de machine. Il peut être employé à la soudure de métaux de nature ou de qualité différentes. Lorsque le système est appliqué à la soudure d'un cercle métallique ou d'un maillon de chaîne, on empêche le courant dérivé par la partie entière d'acquérir une intensité trop vive en lui faisant produire des effets magnétiques qui accroissent l'impédance opposée au flux électrique. M. Thomson a utilisé son procédé à la rivure des tôles, en portant le rivet mis en place au blanc par le courant, ce qui permet de former la tête par une pression minime.

D'après une communication faite par M. Bramwell à la Société royale de Londres, on peut souder une barre de fer ronde, de 29 mm

de diamètre, en 2,25 minutes par le procédé Thomson, tandis que des forgerons exercés ne font qu'une soudure semblable en 4,25 minutes. En désignant par 1 la résistance à la traction de la barre, la résistance de la soudure électrique est 0,92 et celle d'une soudure ordinaire 0,89. Le prix de la soudure électrique est estimé à 0,22 fr.; il comprend 0,06 fr. de main-d'œuvre et 0,16 fr. de force motrice.

796. — **Procédé de Bénardos et Howard.** — En 1881, M. de Bénardos a eu l'idée d'appliquer la chaleur de l'arc voltaïque à la soudure autogène du plomb. Il a étendu ce procédé aux autres métaux usuels. Les pièces à souder sont placées côte à côte sur une table en fonte en relation avec l'un des pôles d'une machine ou d'une batterie d'accumulateurs. Un crayon de charbon communiquant par un conducteur souple avec l'autre pôle est amené en contact avec le point à souder, puis écarté légèrement de manière à développer, au-dessus de ce point, un arc voltaïque dont la chaleur fond le métal et provoque la réunion des pièces en contact.

On évite l'oxydation en disposant, au-dessus des pièces à souder, un fondant siliceux qui soustrait le métal à l'accès de l'oxygène de l'air.

Ce procédé permet de souder deux tôles de fer par leurs abouts. Dans ce but, on biseaute ceux-ci, puis on remplit la cuvette ainsi ménagée entre les tôles au moyen de limaille de fer qu'on fond en provoquant un arc entre le joint et un crayon de charbon, comme précédemment. Si les tôles sont disposées verticalement, on supporte la limaille par un coussinet en charbon.

Pour percer un trou dans une tôle, il suffit de la mettre en contact avec le générateur et de provoquer un arc entre le point à percer et un crayon de charbon. Le métal fond et, si la durée de l'arc est suffisante, celui-ci perfore la pièce.

Pour river deux tôles ainsi percées, il suffit d'introduire une tige métallique dans le trou. En fondant les extrémités, on obtient des masselottes tenant lieu de têtes. On peut aussi remplir l'ouverture de rognures de métal qu'on fond au moyen de l'arc.

M. de Bénardos se sert d'accumulateurs en relation constante avec un générateur électrique dont l'énergie s'emmagasine ainsi jusqu'au moment de l'utilisation. On évite par ce procédé les à-coups provoqués par l'emploi direct des machines.

Examinons les objections que peut soulever le procédé de M. de Bénardos.

Le métal est fondu à la surface, où l'arc voltaïque prend naissance. Cependant, il ne paraît pas que le métal soit brûlé en cet endroit, car sa volatilisation, provoquée par la haute température, forme autour de la surface fluide une atmosphère réductrice qui protège cette surface contre l'oxygène de l'air. Cependant, la texture du métal ainsi soumis à la chaleur est cristalline. En outre, la température élevée atteinte peut provoquer une sorte de rochage et le départ des gaz occlus rend le métal spongieux.

A ces deux défauts, texture cristalline et porosité, on peut apporter deux palliatifs. Le martelage de la matière encore chaude restitue du nerf au métal et resserre le grain. Le recuit au rouge, suivi d'un refroidissement lent, corrige l'aigreur provoquée par la fusion et l'écrouissage.

Ces remèdes sont-ils suffisants? C'est ce que l'expérience peut seule décider.

Les procédés de M. de Bénardos ont été essayés dans plusieurs pays du continent. En France, où ils ont cependant été mis dans les mains d'ingénieurs distingués, ils ne paraissent pas avoir donné de résultats décisifs, car ils sont restés à l'état expérimental. En Russie, il semble qu'on se soit borné à la réparation des pièces défectueuses et à la soudure des petits récipients métalliques.

Il y a deux ans, la firme Lloyd and Lloyd, de Combs Wood (Birmingham) acquit une licence pour la fabrication des réservoirs en fer des freins Westinghouse. Après des tâtonnements assez longs, cette firme, qui constitue l'une des plus importantes du monde pour la fabrication des tuyaux en fer, a réussi non seulement les réservoirs Westinghouse, mais encore des soudures très variées. Ce succès est dû en grande partie à M. l'ingénieur Howard, attaché depuis quelques mois à la firme susdite et qui a compris l'importance qu'il y a à réduire le plus possible la fusion des pièces soudées. Dans cet ordre d'idées, il a avisé les ouvriers maniant les charbons d'avoir à passer ceux-ci rapidement sur les surfaces à chauffer, afin de répartir la chaleur voltaïque sur une masse assez grande pour éviter une concentration trop forte de la

chaleur. Il a fait plus : il a créé des outils spéciaux destinés à donner aux charbons un mouvement de translation rapide ; ainsi les couches profondes de métal arrivent graduellement à la température voulue pour la soudure. Il y a toutefois une limite à la portée du procédé. Il est évident que, comme la chaleur pénètre de l'extérieur à l'intérieur, il existe une épaisseur à partir de laquelle la pénétration ne peut se faire sans détérioration excessive de la surface.

Pour les pièces épaisses, M. Howard a imaginé de faire travailler plusieurs arcs à la fois, en vue d'attaquer le métal de plusieurs côtés et d'arriver plus rapidement à la température générale voulue.

Grâce à ces deux artifices, déplacement rapide de l'arc et emploi simultané de plusieurs arcs, on est arrivé à Combs Wood à des résultats sans précédents, ce qui montre que le succès d'un procédé tient souvent à des détails d'exécution.

L'installation de soudure électrique de Combs Wood comporte une machine à vapeur compound de 150 chevaux, attaquant par un arbre intermédiaire trois dynamos Crompton développant respectivement 150, 200 et 300 ampères sous une tension uniforme de 140 à 150 volts.

La production et l'arrêt instantanés des arcs puissants exigés par la soudure électrique occasionneraient des chocs trop violents aux appareils générateurs ; c'est pourquoi l'on utilise une batterie d'accumulateurs placée en dérivation sur les dynamos et destinée à satisfaire aux demandes très variables de courant.

La batterie a une importance exceptionnelle ; elle comporte 1 800 éléments de Bénardos pesant chacun 31 kg avec l'acide. Ces éléments, du type Planté, comprennent des plaques formées de bandes de plomb alternativement droites et plissées, soudées par leurs bouts dans un cadre de même métal. La soudure autogène des lames est effectuée par le procédé électrique ; c'est même cette opération qui a donné à M. de Bénardos l'idée de la soudure par l'arc voltaïque. Ainsi le moyen est devenu plus important que le but. Les éléments travaillent à faible débit, 1 ampère au maximum par kg de plaques, ce qui assure la conservation de celles-ci sous le régime très variable auquel elles sont soumises. Malgré l'emploi des accumulateurs, les dynamos Crompton *crachent* beaucoup plus que celles utilisées dans les applications à l'éclairage.

De la batterie d'accumulateurs partent deux séries de conducteurs qui se rendent dans la halle des soudures contiguë à l'installation mécanique.

Cette halle est divisée en un certain nombre d'ateliers pourvus d'enclumes et de machines-outils à souder. On a soin d'abriter chaque atelier par des écrans, de manière à éviter que les rayons de l'arc ne frappent les yeux des ouvriers qui traversent la halle.

Les ouvriers soudeurs protègent eux-mêmes leurs yeux par des lunettes en verre d'un rouge rubis et par des écrans à main munis également de verres rouges destinés à intercepter les rayons actiniques. La main qui tient le porte-charbon est aussi préservée par un écran.

Ces précautions sont indispensables, car les arcs de 300 à 500 ampères exercent, sur les yeux et sur l'épiderme, un effet analogue à celui des rayons solaires dans les pays tropicaux. Ces arcs produisent sur la peau l'inflammation connue sous le nom de coup de soleil. On juge par là de leur effet sur le nerf optique. Les rayons obliques mêmes provoquent, sur la rétine, une impression douloureuse.

Vus à travers un verre rouge, ces puissants arcs constituent un phénomène d'une splendeur admirable. L'arc proprement dit, dont la longueur varie de 5 à 10 mm, a la forme d'une coulée incandescente presque droite, d'un centimètre de diamètre. Tout autour est une gerbe de flamme due à la combustion du fer et du carbone volatilisés. Les objets éclairés voisins ont une teinte nettement violette.

On cherche à produire les arcs les plus longs possibles, afin de pouvoir étaler le plus complètement l'action calorifique, les longs arcs étant les plus faciles à déplacer sans rupture.

Les conducteurs positifs venant des accumulateurs sont reliés aux enclumes sur lesquelles appuient les pièces à souder. Les conducteurs négatifs arrivent aux charbons en passant par des rhéostats composés de bandes de fer enroulées en hélice. C'est en variant le nombre de ces bandes qu'on gradue l'intensité du courant suivant l'importance des pièces à souder. Ces résistances sont d'ailleurs nécessaires pour éviter la mise en court-circuit des dynamos.

Les charbons s'échauffent en quelques minutes de fonctionnement. On les plonge dans l'eau après les avoir remplacés par des pièces de rechange.

Voici quelques unes des opérations auxquelles on procède à Combs Wood. Il est à remarquer que chaque opération exige un tour de main et parfois un outillage spécial. On verra ci-après un certain nombre d'artifices employés.

1. — L'usine de Combs Wood ayant la spécialité des tuyaux en fer, c'est particulièrement à ces pièces que la soudure électrique a été appliquée.

Les tuyaux sont faits d'une bande repliée et soudée longitudinalement. Pour les diamètres atteignant 25 à 30 cm, cette opération est extrêmement difficile par les procédés ordinaires et jusque dans ces derniers temps elle avait été remplacée par la rivure.

M. Howard est arrivé à souder électriquement de la manière suivante. Le charbon, amené au-dessus des bords superposés de la tôle, est porté par une pièce à laquelle un moteur électrique imprime un mouvement combiné de rotation et de translation de manière à faire lécher par l'arc une surface de 4 cm sur 10 cm environ. Lorsque la température de l'incandescence est atteinte, la partie chauffée est glissée sur une enclume cylindrique et un marteau, mû par un moteur électrique, bat les lèvres à réunir. On peut ainsi souder des tubes très longs par sections de 10 cm.

2. — Les réservoirs à air comprimé du système Westinghouse sont des cylindres, de 25 cm de diamètre et de 60 cm de longueur, portant deux fonds soudés.

L'opération comporte la soudure longitudinale du cylindre par le procédé ci-dessus décrit et la soudure des fonds bombés.

Auparavant, ces opérations se faisaient exclusivement à l'aide de chalumeaux à gaz montés en vue de cet objet. Bien que ce moyen fournit des résultats satisfaisants, la firme préfère le système électrique. Elle en donne deux raisons. La soudure par le gaz exige des ouvriers forgerons spéciaux payés très cher, alors que la soudure électrique se fait par des ouvriers ordinaires. En outre, le chalumeau à gaz doit brûler d'une manière

continue, tandis que l'arc électrique est éteint aussitôt que la chauffe est terminée.

3. — Une opération très fréquente à Combs Wood est la soudure de collets et de tubulures latérales sur des tuyaux.

Pour des tuyaux dont le diamètre n'est pas trop grand, la soudure des collets se fait par un seul arc. Pour les tuyaux de gros diamètre, on opère autrement. Le tuyau sur l'extrémité duquel on a chassé le collet est placé sur le tour et animé d'un mouvement de rotation pendant lequel 2 ou 3 arcs provoqués par des charbons fixes sont entretenus sur la jointure. Pour un tuyau de 6 mm d'épaisseur et de 13 cm de diamètre, le chauffage par 3 arcs dure environ 5 minutes. On appuie alors, à l'aide d'un levier, un galet contre l'extrémité intérieure du tuyau. La pression exercée suffit pour déterminer la soudure.

Un raccord latéral à un tuyau est préparé en découpant une ouverture convenable à l'aide d'un arc qu'on laisse agir jusqu'à la fusion du métal. Les bords de l'orifice sont relevés au marteau et rapprochés des bords correspondants du raccord. Les deux lèvres sont alors soudées à l'arc et martelées.

On fait des travaux de ce genre extrêmement compliqués; entr'autres, des serpentins en fer enfermés dans des cylindres de même métal, présentant un grand nombre de soudures qui seraient presque irréalisables par tout autre procédé.

L'arc est une source de chaleur qui occupe un volume très restreint et qui peut être amenée en des points inaccessibles à tout autre foyer.

4. — Une des opérations les plus intéressantes est la soudure des boîtes à tubes de la chaudière multitubulaire Mill.

Le problème consiste à souder sur une boîte en acier estampé de 12 mm d'épaisseur un couvercle percé de trous destinés à recevoir les tubes.

Après l'estampage de la boîte, les arêtes, telles que *a b*, présentent des gerçures. On agrandit les fentes par l'arc et on y coule du métal fondu par le même procédé. On martèle après chaque opération pour donner de la fibre à la matière. On soude ensuite le couvercle percé de trous par segments chauffés à l'arc puis martelés. Après un recuit au rouge, les boîtes sont essayées à la presse hydraulique.

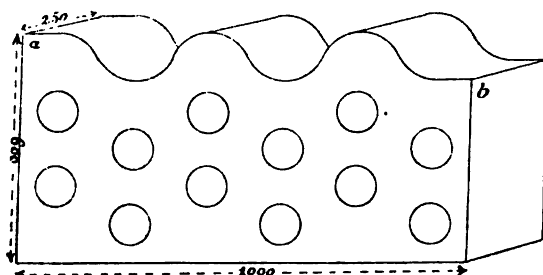



Fig. 524.

5. — Lorsque les pièces à souder atteignent une épaisseur de 25 mm, il n'est plus possible de chauffer le métal par l'arc appliqué simplement à l'extérieur. On fait alors un joint spécial. Les bords à réunir sont taillés en biseau et l'on remplit le creux par du métal fondu à l'arc. Il est évident que, malgré le martelage, ce métal ajouté n'a pas les qualités du métal travaillé; mais il est possible qu'en ajoutant une surépaisseur, on arrive à compenser l'insuffisance de la qualité.



# APPENDICE

---

## DÉFINITIONS PROPOSÉES PAR LE COMITÉ PRÉPARATOIRE DU CONGRÈS D'ÉLECTRICITÉ DE CHICAGO DE 1893 POUR COMPLÉTER LE SYSTÈME D'UNITÉS PRATIQUES.

**797**. — La valeur de l'unité pratique de force magnétomotrice est la dixième partie de celle de l'unité absolue, soit $\frac{1}{4\pi}$ ampère-tour. Cette unité pratique est appelée *gilbert*.

La valeur de l'unité pratique de flux de force magnétique est égale à $10^8$ unités absolues. Cette unité pratique est le *weber*.

La valeur de l'unité pratique d'induction magnétique correspond à $10^8$ unités absolues ou $10^8$ lignes de force par $cm^2$. Cette unité reçoit le nom de *gauss*.

L'unité pratique de résistance magnétique ou reluctance est égale à $10^{-9}$ unités absolues. Cette unité est appelée *oersted*.

L'unité pratique de conductibilité électrique est égale à $10^{-9}$ unités absolues. Cette unité est dénommée *mho*; c'est la réciproque de l'ohm.

L'unité pratique de self-induction ou inductance est égale à $10^9$ unités absolues et appelée *henry*.

Le Comité propose de définir comme suit les *étalons*:

Un ampère est le courant invariable qui, en traversant une solution aqueuse de nitrate d'argent, suivant les spécifications recommandées par le Board of Trade, dépose 0,001118 gramme d'argent par seconde.

Un ohm est la résistance offerte, à la température de la glace fondante, par une colonne de mercure ayant une masse de 14,4521 grammes, une section constante et une longueur de 106,3 cm.

Un volt est le produit de cet ampère par cet ohm.

La bougie étalon est l'intensité lumineuse donnée par la lampe à l'acétate d'amyle de Hefner-Alteneck, lorsque les dimensions et la hauteur de flamme sont telles que cette lampe correspond à une bougie décimale.



# Table analytique des matières

## DU SECOND VOLUME

---

Pages.

AVANT-PROPOS.

## DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

### CONDUCTEURS.



### APPAREILS DE SÉCURITÉ.



### SYSTÈMES DIRECTS DE DISTRIBUTION.

Pages

SYSTÈMES INDIRECTS DE DISTRIBUTION.



COMPTEURS ÉLECTRIQUES.



## CANALISATIONS ÉLECTRIQUES.

LIGNES AÉRIENNES.



CANALISATIONS A ENVELOPPES PROTECTRICES.



CANALISATIONS DESTINÉES AUX COURANTS INTENSES.

## ÉLECTROMOTEURS.

### MOTEURS A COURANT CONTINU.



### MOTEURS SYNCHRONIQUES.



### MOTEURS A FLUX INDUCTEUR PÉRIODIQUE.



### MOTEURS A FLUX INDUCTEUR TOURNANT.



## TRANSMISSION ET DISTRIBUTION DE LA PUISSANCE MÉCANIQUE.

APPLICATIONS.



## TRACTION ÉLECTRIQUE.

RÈGLES ET APPLICATIONS.

Pages

PRIX DE REVIENT DE LA TRACTION.



# TÉLÉGRAPHIE.

THÉORIE.



SYSTÈME TÉLÉGRAPHIQUE MORSE.



SYSTÈMES TÉLÉGRAPHIQUES PERFECTIONNÉS.



TÉLÉGRAPHIE SOUS-MARINE.

## TÉLÉPHONIE.

### TÉLÉPHONES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.



### TÉLÉPHONES A PILES OU MICROPHONES.



### APPAREILS DIVERS.



### APPELS ET POSTES TÉLÉPHONIQUES.



### LIGNES TÉLÉPHONIQUES.



### TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE SIMULTANÉES.



### BUREAUX CENTRAUX.

## ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE.

### LAMPES A INCANDESCENCE.



### LAMPES A ARC VOLTAÏQUE.



### PHOTOMÉTRIE.

FIN DU TOME SECOND.

# TABLE ALPHABÉTIQUE

DES

# MATIÈRES DES DEUX VOLUMES

---

Nos DES PARAGRAPHES.

## A

## I



## J

## K



## L



## M

## N



## O



## P

## Q



## R

## S

